

VŠB – Technická univerzita Ostrava  
Fakulta elektrotechniky a informatiky

## **DIPLOMOVÁ PRÁCE**

2012

Bc. Jan Vogl

VŠB – Technická univerzita Ostrava  
Fakulta elektrotechniky a informatiky  
Katedra telekomunikační techniky

Studium nových generací optických sítí založených  
na vlnovém dělení  
Study of New Generations of Fiber Optic Networks  
Based on Wavelength Division

2012

Bc. Jan Vogl

## Zadání diplomové práce

Student:

**Bc. Jan Vogl**

Studijní program:

N2647 Informační a komunikační technologie

Studijní obor:

2601T013 Telekomunikační technika

Téma:

Studium nových generací optických sítí založených na vlnovém dělení  
Study of New Generations of Fiber Optic Networks Based on  
Wavelength Division

Zásady pro vypracování:

- 1.) Rozbor budoucích optických sítí založených na vlnovém dělení.
- 2.) Aplikace vláknově optického zesilovače do optické sítě umístěné v laboratoři N311.
- 3.) Simulace xWDM sítě v prostředí Optiwave Optisystem s aplikovaným zesilovačem.
- 4.) Porovnání simulovaných a reálně naměřených dat.
- 5.) Závěrečné zhodnocení a nastínění dalších vývoje v oblasti optických sítí.

Seznam doporučené odborné literatury:

MA, Maode. *Current Research Progress of Optical Networks*. 1st Edition. [s.l.] : Springer, 2009. 282 p.  
ISBN 978-1402098888.

LAM, Cedric. *Passive Optical Networks: Principles and practice*. Oxford : Elsevier Onc., 2007. 324 p.  
ISBN 978-0-12-373853-0.

DHAINI, Ahmad R. *Next-Generation Passive Optical Networks*. Saarbrücken : VDM Verlag, 2008. 132 p.  
ISBN 978-3836435062.

Formální náležitosti a rozsah diplomové práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.


Vedoucí diplomové práce: **Ing. Jan Látal**

Datum zadání: 18.11.2011

Datum odevzdání: 04.05.2012

  
prof. RNDr. Vladimír Vašínek, CSc.  
vedoucí katedry



  
prof. RNDr. Václav Snášel, CSc.  
děkan fakulty

### Místopřísežné prohlášení studenta

Prohlašuji, že jsem celou diplomovou práci včetně příloh vypracoval samostatně pod vedením vedoucího diplomové práce a uvedl jsem všechny použité podklady a literaturu, ze kterých jsem čerpal.

V Ostravě ..... 3.5. 2012 .....

..... Jan Vašínek .....  
Jméno Příjmení

### Poděkování

Na tomto místě bych rád poděkoval všem, kteří mi nějakým způsobem pomohli při vypracovávání diplomové práce. Velký dík patří vedoucímu práce Ing. Janu Látalovi a prof. RNDr. Vladimíru Vašínkovi, CSc., za poskytnutou podporu a odborné vedení.

Prohlašuji, že:

- jsem byl seznámen s tím, že na moji diplomovou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., autorský zákon, zejména § 35 – užití díla v rámci občanských a náboženských obřadů, v rámci školních představení a užití díla školního a § 60 – školní dílo,
- beru na vědomí, že Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava (dále jen „VŠB-TUO“) má právo nevýdělečně ke své vnitřní potřebě diplomovou práci užít (§ 35 odst. 3),
- souhlasím s tím, že diplomová práce bude v elektronické podobě uložena v Ústřední knihovně VŠB-TUO k nahlédnutí a jeden výtisk bude uložen u vedoucího diplomové práce. Souhlasím s tím, že údaje o kvalifikační práci budou zveřejněny v informačním systému VŠB-TUO,
- bylo sjednáno, že s VŠB-TUO, v případě zájmu z její strany, uzavřu licenční smlouvu s oprávněním užít dílo v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona,
- bylo sjednáno, že užít své dílo – diplomovou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití mohu jen se souhlasem VŠB-TUO, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly VŠB-TUO na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše),
- beru na vědomí, že odevzdáním své práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů, bez ohledu na výsledek její obhajoby.

V Ostravě ..... 3.5.2011 .....

..... Jan Vogl .....  
Jméno Příjmení

Jméno a příjmení autora práce:

Jan Vogl

Adresa trvalého bydliště autora práce:

Rakůvka 35

79857 Laškov

## Anotace diplomové práce

VOGL, Jan. *Studium nových generací optických sítí založených na vlnovém dělení: diplomová práce*. Ostrava: VŠB – Technická univerzita Ostrava, Fakulta elektroniky a informatiky, Katedra telekomunikační techniky, 2012, 109 s. Vedoucí práce: Látal, Jan.

**Abstrakt:** Cílem této diplomové práce je ověření možného nasazení optických zesilovačů do přístupových sítí založených na vlnovém multiplexu, kdy pro samotné ověření bylo využito simulací i praktického měření. První část práce se zaměřuje na teoretický rozbor zadané problematiky. Blíže je zde popsán vlnový multiplex, dále pak kompletní popis optických přístupových sítí a v neposlední řadě také základní rozbor tří nejpoužívanějších zesilovacích prvků. Následující část je tvořena navrženými modely simulovaných sítí L-R PON a WDM-PON s aplikovaným optickým zesilovačem a srovnání jejich výsledků. Poslední část práce pak prezentuje výsledky s praktického měření na WDM-PON síti s aplikovaným EDFA zesilovačem, zároveň jsou dosažené výstupy porovnány s výsledky ze simulací.

**Klíčové slova:** optická přístupová síť; optický zesilovač; simulace; WDM-PON; EDFA.

## Annotation of Master Thesis

VOGL, Jan. *Study of New Generations of Fiber Optic Networks Based on Wavelength Division: Master Thesis*. Ostrava: VŠB – Technical University of Ostrava, Faculty of Electrical Engineering and Computer Science, Department of Telecommunications, 2012, 109 p. Thesis head: Látal, Jan.

**Abstract:** The aim of this master thesis is to verify the possible deployment of optical amplifiers in access networks based on wavelength multiplexing, where the actual verification was used simulations and practical measurements. The first part focuses on the theoretical analysis a specified issue. Closer is described wavelength multiplexing, then a complete description of the optical access networks and last but not least, the basic analysis of the three most common amplifiers elements. The following section is made up of the proposed models simulated networks L-R PON and WDM-PON optical amplifier applied and compared their results. The last part presents the results of practical measurements on WDM-PON network with applied EDFA amplifier, while the outputs are achieved compared with the results of the simulations.

**Keywords:** Optical access network; optical amplifier; simulation; WDM-PON; EDFA.

## SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

<b>AES</b>	(Advanced encryption standard)	šifrovací metoda
<b>AP</b>	(Attenuation Profile)	útlumový profil
<b>APD</b>	(Avalanche photodiode)	lavinová fotodioda
<b>ASE</b>	(Amplified spontaneous emission)	zesílená spontánní emise
<b>ATM</b>	(Asynchronous Transfer Mode)	asynchronní přenosový mód
<b>AWG</b>	(Arrayed Waveguide Grating)	vlnovody uspořádané do mřížky
<b>BER</b>	(Bit Error Rate)	bitová chybovost
<b>CATV</b>	(Cable Analog Television)	kabelová televize
<b>CD</b>	(Chromatic Dispersion)	chromatická disperze
<b>CWDM</b>	(Coarse Wavelength Division Multiplex)	hrubý vlnový multiplex
<b>DFB</b>	(Disturbed FeedBack)	DFB laser
<b>DWDM</b>	(Dense Wavelength Division Multiplex)	hustý vlnový multiplex
<b>EDFA</b>	(Erbium Doped Fiber Amplifier)	erbiem dopovaný optický zesilovač
<b>FPL</b>	(Fabry-Perot Laser)	Fabry-Perotův laser
<b>GEM</b>	(GPON Encapsulation Method)	metoda přenosu ATM buněk a Ethernet rámců v GPON
<b>IEEE</b>	(Institute of Electrical and Electronics Engineers)	institut pro elektronické a elektrotechnické inženýrství
<b>ITU</b>	(International Telecommunication Union)	mezinárodní telekomunikační unie
<b>L-R PON</b>	(Long Reach PON)	standard AON
<b>OAN</b>	(Optical Access Network)	optická přístupová síť
<b>ODN</b>	(Optical Distribution Network)	optická distribuční síť
<b>OFA</b>	(Optical Fiber Amplifier)	optické vláknové zesilovače
<b>OLT</b>	(Optical Line Termination)	optické linkové zakončení
<b>ONT</b>	(Optical Network Termination)	optická síťová jednotka
<b>ONU</b>	(Optical Network Unit)	optická ukončovací jednotka
<b>OSA</b>	(Optical Spektral Analyzer)	optický spektrální analyzátor
<b>OSI model</b>	(Open Systems Interconnection model)	referenční model ISO/OSI
<b>P2MP</b>	(Point – To – Multipoint)	spojení bod – více bodů
<b>P2P</b>	(Point – To – Point)	spojení bod – bod
<b>PIN</b>	(P-I-N photodiode)	fotodioda typu PIN

<b>PMD</b>	(Polarization Mode Dispersion)	polarizační modová disperze
<b>QoS</b>	(Quality of Service)	kvalita služeb
<b>SNMP</b>	(Simple Network Management Protocol)	protokol pro správu sítě
<b>SNR</b>	(Signal-to-Noise Ratio)	odstup signál šum
<b>SOA</b>	(Semiconductor Optical Amplifiers)	polovodičový optický zesilovač
<b>SPON</b>	(Super PON)	standard AON
<b>TDM</b>	(Time Division Multiplex)	časový multiplex
<b>UDWDM</b>	(Ultra Dense Wavelength Division Multiplex)	ultra jemný vlnový multiplex
<b>VCSEL</b>	(Vertical-Cavity Surface-Emitting laser)	VCSEL laser
<b>WDM</b>	(Wavelength Division Multiplex)	vlnový multiplex
<b>WWDM</b>	(Wide Wavelength Division Multiplex)	široký vlnový multiplex



## OBSAH

1	Úvod .....	11
2	Vlnové multiplexy .....	12
2.1	Technologie CWDM .....	12
2.2	Technologie DWDM .....	14
2.3	Kombinace technologií CWDM a DWDM .....	15
2.4	Technologie WWDM .....	16
2.5	Provoz vlnových multiplexů po jediném optickém vlákně .....	16
2.5.1	Interleaver .....	17
3	Přístupové optické sítě .....	18
3.1	Struktura přístupových optických sítí .....	19
3.2	Aktivní optické sítě AON .....	20
3.3	Pasivní optické sítě PON .....	21
3.3.1	APON/BPON .....	22
3.3.2	GPON .....	22
3.3.3	EPON .....	22
3.3.4	10G-EPON .....	23
3.3.5	XG-PON .....	24
3.3.6	WDM -PON .....	26
3.4	Další generace optických přístupových sítí .....	28
3.4.1	SPON .....	28
3.4.2	L – R PON .....	29
3.4.3	Hybridní DWDM - TDM L-R PON .....	30
4	Optické zesilovače .....	32
4.1	Použití optických zesilovačů .....	33
4.2	Optické vláknové zesilovače .....	34
4.2.1	EDFA .....	36
4.2.2	PDFA .....	39
4.2.3	TDFA .....	39
4.2.4	YDFA .....	39
4.3	Polovodičové optické zesilovače .....	40

4.4	Ramanovské zesilovače.....	42
4.5	Srovnání zesilovačů.....	44
5	Měření základních parametrů v přístupových sítích.....	45
5.1	Měření BER.....	45
5.1.1	Q – faktor.....	45
5.1.2	Bitová chybovost.....	45
5.1.3	Diagram oka .....	46
5.2	Optický spektrální analyzátor (OSA) .....	46
6	Simulace.....	48
6.1	L – R PON.....	48
6.1.1	Popis topologie L – R PON.....	48
6.1.2	Výsledky simulace.....	51
6.2	WDM-PON s aplikovaným zesilovačem .....	54
6.2.1	Popis topologie WDM-PON.....	54
6.2.2	Výsledky simulace.....	57
6.2.3	Zhodnocení dosažených výsledků .....	76
7	Praktické měření.....	78
7.1	Popis experimentálního měření.....	78
7.2	Použité měřicí přístroje.....	81
7.3	Provedená měření .....	84
7.3.1	Maximální dosah WDM-PON.....	84
7.3.2	Aplikování optického vláknového zesilovače .....	90
7.4	Srovnání dosažených výsledků se simulací.....	100
8	Závěr.....	106
	Literatura .....	108
	Příloha .....	110

## 1 Úvod

Prudký rozmach Internetu silně ovlivnil a pozměnil tvář dnešní společnosti. Tato informační revoluce do jisté míry za svůj vznik vděčí rozvoji globálních optických komunikačních sítí, které umožňují vysokorychlostní přenos informace na velké vzdálenosti. Zmíněné telekomunikační sítě se nejprve uplatnily na páteřních, metropolitních trasách a v poslední době dokonce vytlačují klasické metalické kabeláže ze sítí přístupových. Zejména velký vliv na zmíněném faktu má koncový uživatel, který požaduje využití nejmodernějších služeb např. IPTV (televizní vysílání přes IP protokol), VoIP (telefonní služba přes IP protokol) apod., což s sebou nese problém v podobě dostatečné šířky přenosového pásma, kdy klasické metalické kabeláže již nastaveným nárokům nevyhovují. Pro docílení ještě vyšších hodnot šířky přenosového pásma se na optické vlnovody začaly aplikovat různé technologie multiplexování. Jedním z nejpoužívanějších optických multiplexů, jenž se aplikoval nejdříve na páteřních a metropolitních sítích je CWDM a DWDM. Bylo tedy jen otázkou času, kdy se metody multiplexování rozšíří i do sítí přístupových. V České republice se tento typ přístupové sítě nachází pouze na Vysoké škole báňské – Technické univerzitě Ostrava, Fakultě elektrotechniky a informatiky, Katedře telekomunikační techniky.

Velmi důležitou otázkou, která v dnešní době nabývá na aktuálnosti, je počet koncových uživatelů, které je možné připojit k síti na maximální možnou vzdálenost. Ideálním řešením se zcela jasně jeví možnost, aby došlo k připojení co nejvíce koncových uživatelů na co největší vzdálenost. Tohoto výsledku lze dosáhnout pouze tak, že do přístupové sítě nějakým způsobem aplikujeme zesilovací prvky. Kvůli zachování integrity optického svazku se volí především optické vláknové zesilovače, kde se zesílení signálu dosahuje pomocí speciálně dopovaných optických vláken. Jedním z nejpoužívanějších optických vláknových zesilovačů je typ EDFA.

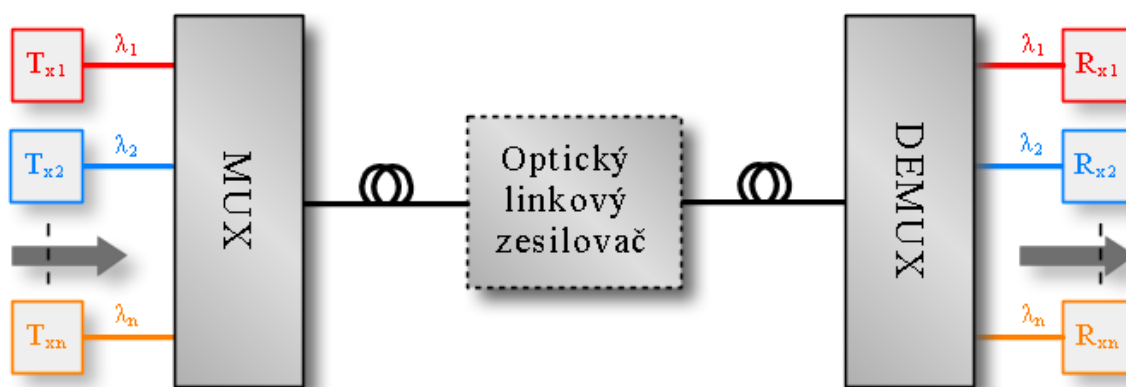
Struktura práce se dělí do tří základních oddílů. První část práce se věnuje teoretickému rozboru zadané problematiky, uvádí popis vlnového multiplexu, základní dělení přístupových sítí, popis dalších generací optických sítí a také podrobný popis zesilovačů aplikovaných v optických sítích.

V druhé části práce jsou popsány simulace optických přístupových sítí, které byly navrženy a odsimulovány v softwarovém prostředí programu Optiwave Optisystem 10.0. První simulace je zaměřena na síť dlouhého dosahu (další generace optických sítí). Jmenovitě byla navržena síť Long Reach PON (L-R PON). Druhá simulace se zabývá možností aplikování tří základních druhů zesilovačů (vláknové optického zesilovače, Ramanova zesilovače, polovodičového optického zesilovače) do přístupové sítě WDM – PON. Obě navržené topologie jsou analyzovány z hlediska přenosových parametrů.

Třetí část práce se věnuje praktickému měření, kdy je do reálné přístupové sítě WDM-PON aplikován zesilovač, a to optický vláknový zesilovač (EDFA). Na této topologii pak byla provedena základní měření, která jsou v práci zpracována a následně analyzována.

## 2 Vlnové multiplexy

Technologie vlnového dělení WDM umožňuje paralelně přenášet po jednom optickém vlákně několik navzájem oddělených vlnových délek a tím znásobit jeho celkovou kapacitu. Na každou z nosných frekvencí je ve vysílači namodulována informace. V multiplexeru se spojí všechny příspěvkové optické kanály do jednoho optického vlákna (způsob multiplexingu viz kapitola 2). Pokud chceme realizovat  $n$ -kanálový spoj, je zapotřebí použít kromě jednoho multiplexeru a demultiplexeru také  $n$  modulátorů, optických zdrojů záření, demodulátorů a fotodetektorů. Je možné také v distribuční části sítě použít optický zesilovač, který nám zajistí prodloužení vzdálenosti dvou koncových zařízení. V přijímacím linkovém zakončení dochází k demultiplexování podle frekvenčních pásem na signály v okolí jednotlivých nosných frekvencí a ty jsou pak přijaty jednotlivými přijímači. Takto přijaté signály se poté mohou vhodně vyhodnotit nebo dále zpracovat. Na rozhraní mezi optickým demultiplexerem a přijímači končí bitová a protokolová nezávislost.



Obr. 2.1: Obecné blokové schéma systému WDM. [5]

### 2.1 Technologie CWDM

Technologie CWDM je forma vlnového multiplexu, která využívá větší odstup mezi jednotlivými přenosovými kanály, než je tomu u klasické technologie hustého multiplexu DWDM. Samotný princip CWDM není nový. Již v doporučení ITU-T G.671 bylo specifikováno, že CWDM multiplex by měl mít odstup jednotlivých kanálů menší než 50 nm a větší než 1000 GHz (což je přibližně 8 nm pro vlnovou délku 1550 nm). Teprve příchod pevné specifikace jednotlivých vlnových délek dal základ pro velký rozvoj a hromadné nasazení této technologie [2].

Standard ITU-T G.694.2 – „Spectral grids for WDM applications: CWDM wavelength grid“ definuje velikost odstupů jednotlivých kanálů vlnových délek pro použití CWDM technologie tak, aby bylo možné jako zdroj záření použít laserové diody bez nároku na chlazení (např. DFB lasery, FPL nebo v blízké budoucnosti VCSEL). Jednotlivé vlnové délky byly zvoleny tak, aby byly kompatibilní s klasickými používanými vlnovými délkami 1310 nm a 1550 nm. Jak již bylo řečeno, standard předpokládá použití nechlazených laserových zdrojů s celkovou tolerancí od nominální střední vlnové délky v rozsahu  $\pm 6$  až 7 nm. Vzhledem k toleranci, která je povolena standardem, se v praxi ustálila šířka pásma v rozsahu 6,5 nm, jak pro používané

CWDM filtry, tak i pro toleranci vlnových délek laserových diod pro celý rozsah pracovních teplot [2].

Všechny vlnové délky CWDM technologie (k dispozici je 18 kanálů) můžeme využít jen s vláknem typu „Low Water Peak“ neboli s plným spektrem dle standardu G.652.C/D. Pro kratší vzdálenosti, kdy můžeme vzhledem k útlumu používat vlnové délky již od 1270 nm, je pro standardní optické vlákno G.652 k dispozici 16 kanálů (1270 nm – 1610 nm). Pro delší vzdálenosti už nelze přenosové okno v pásmu 1300 nm použít a zbývá nám k dispozici celkem osm přenosových kanálů (pásma S + C + L), v rozsahu od 1470 do 1610 nm [2].

Označení – kód kanálu CWDM	Nominální vlnová délka [nm]	Rozdělení spektra jednovidového vlákna 9/125 $\mu\text{m}$
27	1270	<b>O – Original 1260 – 1360 nm</b> Původní přenosové pásmo v oblasti 1310 nm
29	1290	
31	1310	
33	1330	
35	1350	
37	1370	<b>E – Extended 1360 – 1460 nm</b> Nové pásmo, využitelné pouze s novými typy vláken „Low Water Peak“ podle standardu ITU-T G.652.C
39	1390	
41	1410	
43	1430	
45	1450	
47	1470	<b>S – Short 1460 – 1530 nm</b> Pásmo kratších vlnových délek, které je využíváno pro nové typy přenosů, zvláště CWDM
49	1490	
51	1510	
53	1530	
55	1550	<b>C – Conventional 1530 – 1565 nm</b>
57	1570	<b>L – Long 1565 – 1625 nm</b> Pásmo dlouhých vlnových délek, využíváno pro novější typy přenosů
59	1590	
61	1610	

Tab. 2.1: Tabulka vlnových délek CWDM podle standardu ITU-T G. 694.2. [2]

CWDM se zatím nejvíce uplatňuje v metropolitních sítích, kde se s výhodou může kombinovat s technologií DWDM a vytvářet tak topologie s velkými možnostmi šířky pásma. CWDM umožňuje přenášet v každém kanále Gbit Ethernet do vzdálenosti až 80 km, s přenosovou rychlostí 2,5 Gbit/s do vzdálenosti 50 km [2].

#### Hlavní výhody CWDM:

- Nízká pořizovací a provozní cena technologie vzhledem k DWDM.
- Snadné nasazení již ve vybudovaných optických trasách.
- Tolerance od střední vlnové délky v rozsahu  $\pm 6 - 7$  nm.
- V jednom kanálu může být použito až 16 dalších kanálů (záleží to na typu optického vlákna).
- Díky jednoduchosti v porovnání s DWDM má nižší energetickou náročnost i jednodušší správu použitých prvků.

## 2.2 Technologie DWDM

Hustý vlnový multiplex se používá hlavně na dálkových optických trasách a vyžaduje precizní laserové chlazené zdroje DFB (Distributed FeedBack laser), které mají extrémně úzkou spektrální čaru a ostatní náročné optické komponenty. Jako jsou optické zesilovače EDFA (Erbium Doped Fiber Amplifier), kompenzátory disperze, vysoce selektivní spektrální filtry apod. Tato zařízení jsou velice citlivá na kmitočtovou a teplotní stabilitu. Což vede ke skutečnosti, že technologie DWDM je ekonomicky velice nákladná [2].

Varianta DWDM specifikovaná v doporučení ITU-T G.694.1 „Spectral grids for WDM applications: DWDM frequency grid“, využívá menší rozteče mezi jednotlivými kanály a potřebuje podstatně nižší toleranci vlnové délky jednotlivých nosných. Tím pádem dovoluje ve stejném pásmu umístit větší počet vlnových délek, typicky 32, 64 a perspektivně až 96 v jednom uvažovaném pásmu. Pro využití v pasivních optických přístupových sítích se použití vlnového dělení DWDM uvažuje o pásmech C a L s roztečí jednotlivých vlnových délek cca 0,8 nm, což by umožnilo přenos 32 až 80 nosných v rozsahu vlnových délek 1530 až 1565 nm. Pro dálkové a páteřní optické spoje pak pásma C, L a S s roztečí nosných cca 0,4 nm a použitím 80 až 160 nosných v jednom vlákne, což by mělo odpovídat vlnovým délkám v rozsahu od 1490 nm (200,95 THz) do 1620 nm (186,00 THz). Existují již teoretické studie pro zavedení ultra jemného vlnového dělení UDWDM (Ultra DWDM) s roztečí vlnových délek cca 0,1 nm [4].

DWDM rastr vychází z normalizované pilotní frekvence 193,1 THz. Od této frekvence se odvíjí rastr s rozestupy jednotlivých kanálů v rozsahu 100 GHz, 50 GHz, 25 GHz, ve vývoji je již i 12,5 GHz. Pro správnou funkci a kvalitu přenosu je nutné, aby se vlnová délka neodchylovala od předepsané vlnové délky o více než 0,2 odstupu nosných, což odpovídá toleranci  $\pm 0,16$  nm pro 100 GHz rastr [2].

### Hlavní výhody DWDM:

- V jednom přenosovém pásmu umožňuje přenos až 96 komunikačních kanálů.
- Díky EDFA zesilovačům umožňuje velký dosah.
- Snadná rozšiřitelnost o další datové kanály.
- Možnost vytvoření různých logických topologií, na kterých se využije DWDM/CWDM.
- Připravenost pro nastupující nové technologie.
- Management pomocí dohledného kanálu podporující SNMP (Simple Network Management Protocol) – protokol pro správu sítě.

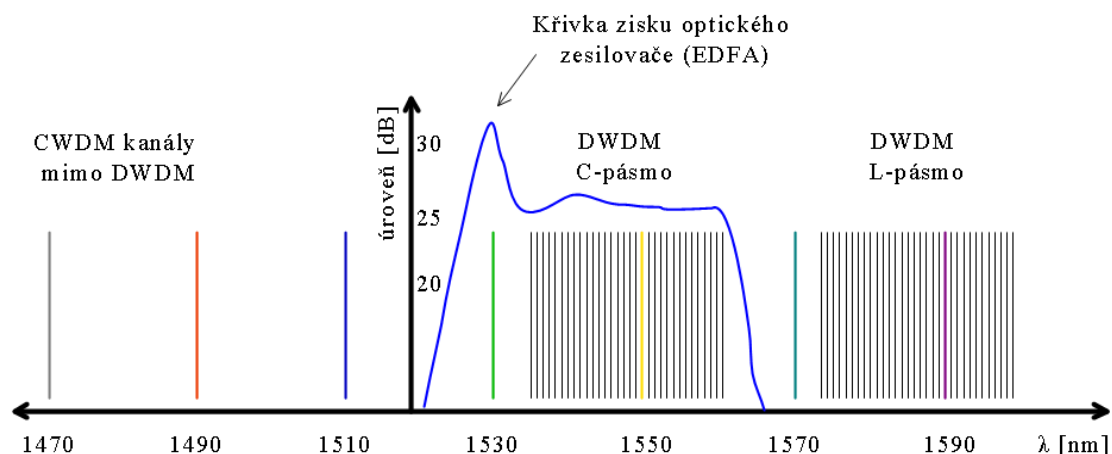
Frekvence [THz]	Kanál DWDM dle ITU	Vlnová délka [nm]
192,0	920	1561,42
192,1	921	1560,61
192,2	922	1559,79
192,3	923	1558,98
192,4	924	1558,17
192,5	925	1557,36
192,6	926	1556,55
192,7	927	1555,75

192,8	928	1554,94
192,9	929	1554,13
193,0	930	1553,33
193,1	931	1552,52
193,2	932	1551,72
193,3	933	1550,92
193,4	934	1550,12
193,5	935	1549,32
193,6	936	1548,51
193,7	937	1547,72
193,8	938	1546,92
193,9	939	1546,12
194,0	940	1545,32
194,1	941	1544,53
194,2	942	1543,73
194,3	943	1542,94
194,4	944	1542,14
194,5	945	1541,35
194,6	946	1540,56
194,7	947	1539,77
194,8	948	1538,98
194,9	949	1538,19
195,0	950	1537,40
195,1	951	1536,61
195,2	952	1535,82
195,3	953	1535,04
195,4	954	1534,25
195,5	955	1533,47
195,6	956	1532,68
195,7	957	1531,90
195,8	958	1531,12
195,9	959	1530,33
196,0	960	1529,55

Tab. 2.2: Tabulka vlnových délek části pásma „C“ DWDM 100 GHz podle ITU-T G. 694.1. [2]

### 2.3 Kombinace technologií CWDM a DWDM

Technologie CWDM lze v případě potřeby vhodně zkombinovat s technologií hustého multiplexu DWDM. Pro technologii DWDM se používají EDFA optické zesilovače, které se běžně dodávají pro práci v pásmu C nebo L, případně pro obě pásma dohromady. Pro běžnou situaci s klasickým osmikanálovým CWDM multiplexem máme tedy k dispozici pro budoucí rozšíření pouze dva kanály, kanál 53 a 55. Vezmeme-li v úvahu šířku CWDM kanálu, pro použití systému DWDM je prakticky v tomto kanálu č. 55 (1551 nm) k dispozici 16 kanálů s rozestupem 100 GHz. V kanálu č. 53 je v C pásmu k dispozici prakticky jen 8 kanálů DWDM s rastrem 100 GHz. Celková využitelná kapacita tohoto systému bude tedy 6 kanálů CWDM a 24 kanálů DWDM [2].



Obr. 2.2: Kombinace CWDM a DWDM – využití pásma. [2]

## 2.4 Technologie WWDM

V dnešní době se ještě v některých systémech můžeme setkat s tzv. „širokým“ vlnovým multiplexem WWDM. Jedná se o starší technologii, která konkuruje vyspělejší CWDM a DWDM nižší pořizovací a provozní cenou. Většinou se pro komunikaci využívají čtyři vlnové délky, které vycházejí s pracovních vlnových délek konvenčních vláken - tj. okolo 850 nm pro mnohavidová vlákna a oblast kolem 1310 nm pro jednovidová vlákna, kdy odstup mezi sousedními vlnovými délkami je  $< 20$  nm. Nejčastější WWDM nachází uplatnění pro přenos Gbit-ového a 10Gbit-ového Ethernetu.

## 2.5 Provoz vlnových multiplexů po jediném optickém vlákne

V případě, kdy potřebujeme dosáhnout nižších cen vlastního řešení komunikačního systému, můžeme použít pro přenos dat pouze jedno optické vlákno. To v zásadě není problém pro technologii CWDM a DWDM na krátké vzdálenosti (není potřeba do systému komponovat optický zesilovač EDFA), kdy použijeme sousední vlnové délky proti sobě jako příjem a vysílání a tak i zvýšíme izolaci mezi jednotlivými kanály. Počet přenosových kanálů, které máme k dispozici, odpovídá přesně polovině počtu použitých vlnových délek.

Problém nastává pro delší trasy a větší počet kanálů DWDM (zvýšení útlumu), kdy je nutné nasazení EDFA zesilovačů. Musíme proto vhodně zajistit oddělení směru vysílání a příjmu pro použití standardních EDFA zesilovačů (v současné době existují sice obousměrné EDFA zesilovače, ale zatím převažují nevýhody nad výhodami jejich použití). K oddělení směru lze v zásadě použít několik způsobů [2]:

- Jeden z nejjednodušších je použití optických cirkulátorů. Optický cirkulátor umí rozdělit obousměrný signál z jednoho do dvou vláken a je vlnově nezávislý. Jeho použití spolu s EDFA zesilovači je limitováno vlivem zpětného rozptylu světla ve vlákne, kdy dochází k zhoršení optického šumu v trase, a pro delší vzdálenosti s více EDFA zesilovači je toto dělení nepoužitelné.
- Dále můžeme použít pásmový filtr (rozdělení celého pásma DWDM na dvě poloviny), kdy horní polovina pásma je určena pro jeden směr přenosu a druhá polovina pro

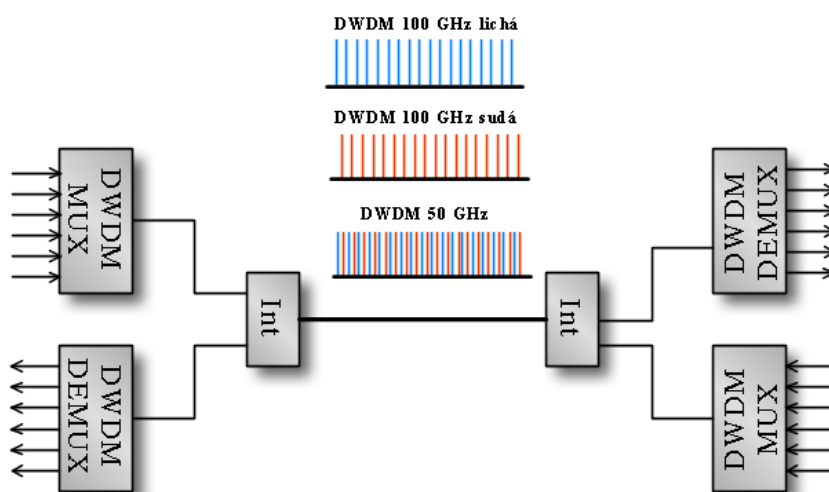


obrácený směr. Toto řešení se používá nejvíce, nevýhodou ve srovnání s použitím interleaveru je nižší izolace mezi kanály.

- Pokud nám postačí na jednom vlákně s CWDM systémem provozovat pouze dalších 8 DWDM kanálů, lze na rozdělení směrů příjem/vysílání použít přímo vlastní CWDM Multiplexer/Demultiplexer. Pro jeden směr tak použijeme kanál CWDM č. 53 a pro druhý směr kanál CWDM č. 55.
- Technicky nejlépe vychází použití tzv. interleaveru, který rozdělí pásmo DWDM s odstupem 100 GHz na dvě s odstupem 200 GHz (rozdělí vlnové délky sudá/lichá do dvou směrů). Zvýší se tak izolace mezi jednotlivými kanály za cenu dražší použité optické součástky.

### 2.5.1 Interleaver

Optický interleaver je 3-portové pasivní optické zařízení, které slouží ke spojení dvou DWDM kanálů (sudý, lichý) do jednoho uceleného DWDM pásma. Tato inovativní technika umožní rozšířit počet kanálů na jednom optickém vlákně. Například ve většině zařízení DWDM je standardní rozestup kanálů 100 GHz, ale pokud použijeme odstup nosných frekvencí 50 nebo 25 GHz můžeme pomocí interleaveru dosáhnout zdvojnásobení nebo dokonce čtyřnásobení počtu kanálů na vlákně. Pokud máme dva multiplexní signály s rastrem 100 GHz, pak po použití interleaveru dostaneme signál s rastrem 50 GHz (je možné dále použít interleaver). Na přijímací straně je možné použít tu samou součástku s opačnou funkcí deinterleaveru. Pomocí této metody tedy lze modernizovat optickou síť bez instalace většiny součástek nebo zvyšování šířky pásma.



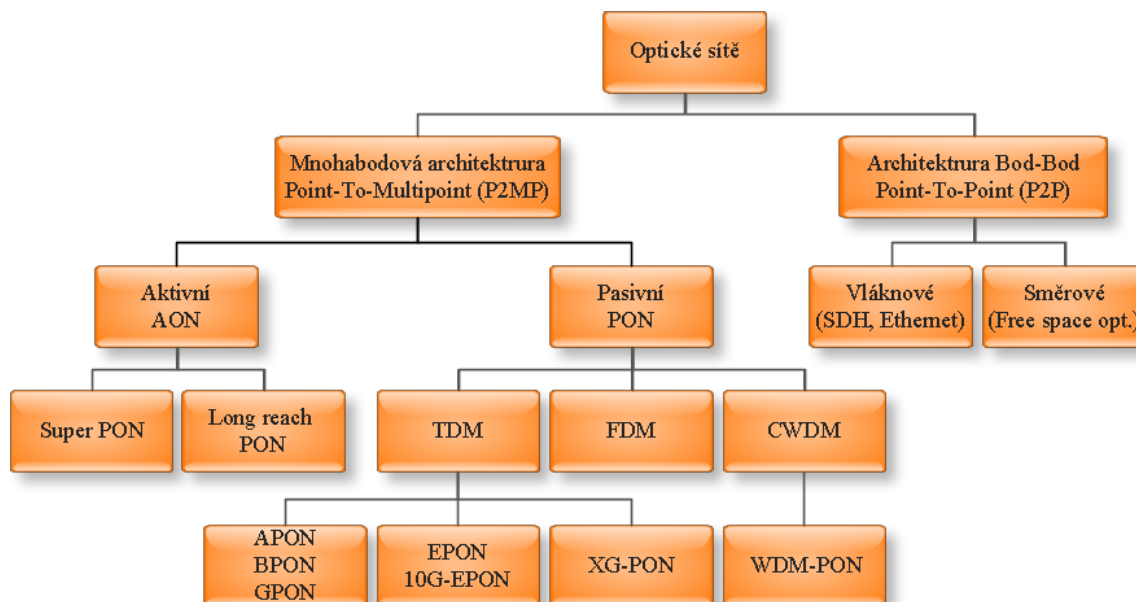
Obr. 2.3: Optický interleaving.

### 3 Přístupové optické sítě

Přístupové sítě, založené na optickém principu, můžeme v podstatě rozdělit na dvě skupiny, a to na pasivní síť PON (Passive Optical Network), aktivní síť AON (Active Optical Network). Hlavní rozdíl mezi těmito přístupovými sítěmi je ten, že PON ke svému provozu v distribuční části sítě nepotřebuje tzv. aktivní prvky. To jsou prvky, které k permanentnímu chodu potřebují elektrickou energii. Této pasivity prvků již však nedosáhneme v hlavních a koncových optických jednotkách sítě PON. Oproti tomu sítě AON využívají aktivní prvky (optické zesilovače, regenerátory signálů apod.) i v distribuční části sítě, čímž dosáhnou větších provozních vzdáleností a většího dělicího poměru (větší počet koncových uživatelů).

Dále lze optické přístupové sítě rozdělit vzhledem k řešení optického přístupu na architekturu:

- Mnohabodová architektura (Point – To – Multipoint, P2MP) – tato architektura na rozdělení optických signálů používá pasivní děliče (splittery), proto se s tímto typem spojení především setkáme v PON sítích.
- Architektura bod – bod (Point – To – Point, P2P) – při přenosu založeném na této architektuře se pro větvení signálu využívají aktivní prvky, proto se tato struktura sítě používá v AON.

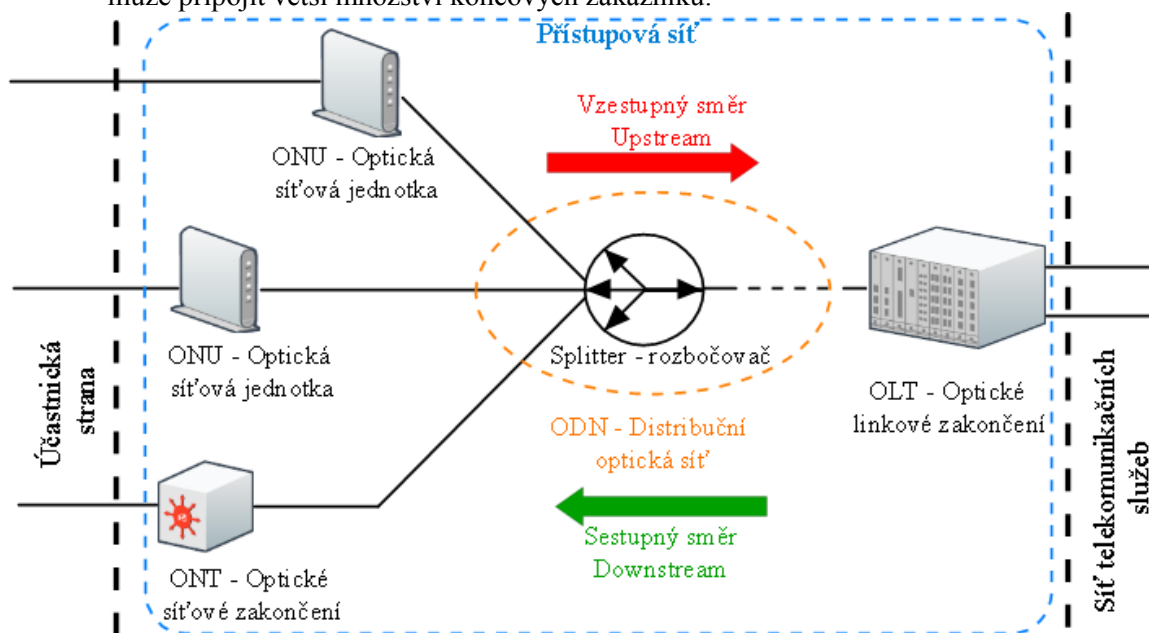


Obr. 3.1: Rozdělení optických přístupových sítí.

### 3.1 Struktura přístupových optických sítí

Mezi základní stavební prvky tvořící přístupovou síť patří především: [4]

- **Optická distribuční síť** – ODN (Optical Distribution Network), kterou tvoří soubor všech pasivních a aktivních optických přenosových prostředků mezi optickým linkovým zakončením OLT a optickými zakončujícími a síťovými jednotkami ONT, ONU. Patří sem zejména optické vlákno, pasivní a aktivní optické rozbočovače, konektory, spojky a vlnové filtry.
- **Optická přístupová síť** – OAN (Optical Access Network), což je soubor všech optických distribučních sítí připojených k jednomu optickému linkovému zakončení OLT.
- **Optické linkové zakončení** – OLT (Optical Line Termination). Jedná se o optické zakončující zařízení na straně poskytovatele připojení. Jeho hlavním úkolem je připojení optické sítě k páteřním telekomunikačním sítím, konverze použitých protokolů, distribuce takových signálů a řízení, správa a dohled nad koncovými jednotkami ONU a ONT.
- **Optické síťové zakončení** – ONT (Optical Network Termination). Představuje zakončení na straně uživatele. Provádí zejména adaptaci protokolů mezi optickou přístupovou sítí a rozhraním, případně lokální sítí, uživatelem.
- **Optická síťová jednotka** – ONU (Optical Network Unit). Je zobecněné zakončení na zákaznické straně sítě. Na rozdíl od ONT realizuje připojení koncového uživatele prostřednictvím navazující metalické či bezdrátové sítě (např. VDSL2 či WiFi) a obecně může připojit větší množství koncových zákazníků.



Obr. 3.2: Základní prvky tvořící přístupovou síť. [3]

Samotná struktura optické sítě může být dále modifikována za účelem snížení nákladů pomocí koncepce kombinovaných opticko – metalických přípojek známých pod zkratkou FTTx (Fiber To The ...), které kombinují optickou síť s navazující metalickou strukturou. V souvislosti s optickými přístupovými sítěmi se tak často objevují varianty přípojek označovány jako:

- FTTH (Fiber To The Home) – jedná se o nejideálnější řešení, kdy je optické vlákno zavedeno až ke koncovým bodům sítě (účastnické zásuvky).
- FTTO (Fiber To The Office) – optické vlákno je přivedeno do prostoru koncových uživatelů, kteří vyžadují velké nároky na přenosovou kapacitu.
- FTTB (Fiber To The Building) – kdy optické vlákno je přivedeno do útroby budovy koncových účastníků a ti jsou poté připojeni pomocí vnitřní sítě.
- FTTC (Fiber To The Curb) – optické vlákno je přivedeno do ústředny a odtud se koncoví uživatelé připojují metalickým kabelem.
- FTTCab (Fiber To The Cabinet) – optické vlákno je přivedeno do koncového přístroje např. osobního počítače.
- FTTN (Fiber To The Node) – u této varianty je optické vlákno přivedeno do distribučního uzlu, odkud je možné připojit velké množství koncových uživatelů většinou pomocí metalických přípojek.

### 3.2 Aktivní optické sítě AON

Aktivní optická síť v úseku mezi OLT a ONT/ONU má umístěny i aktivní prvky. Z čehož je zřejmé, že při návrhu AON je zapotřebí zahrnout infrastrukturu napájecí sítě pro aktivní prvky. Tato architektura může být nasazena v přístupových sítích založených na obou typech spojovací topologie, tedy P2P a P2MP, kdy každému účastníkovi je přiřazeno vlastní optické vlákno (může se jednat i o dvě separátní vlákna). U P2P se jedná o optické vlákno umístěné mezi OLT a ONT/ONU (má velký význam pro bezpečnost sítě), kdežto u P2MP se jedná o optické vlákno mezi aktivním splitterem a jednotkou ONT/ONU. Veškeré prvky v síti pracují na optickém ethernetu, což je nesmírnou výhodou. Umožňují vzdálenou správu a lze kombinovat zařízení od různých výrobců. U P2P nedochází k agregaci poskytované konektivity, jelikož kapacita přenosového pásma není s nikým dělena. Tento kanál má plně symetrický provoz pro downstream a upstream. AON sítě se nejčastěji nasazují tam, kde jsou vysoké požadavky na šířku pásma, nebo kde by byla vzdálenost mezi OLT a ONT/ONU větší, než je teoretický dosah PON. Shrnutí výhod a nevýhod líčí Tab. č. 3.1

Výhody	Nevýhody
Aktivní prvky sítě s možností správy	Síťové napájení aktivních prvků
Agregace 1:1	Vyšší spotřeba elektrické energie
Symetrický kanál downstream/upstream	Vyšší cenová zátěž
Větší překlenutelná vzdálenost	Velké množství konektorů, spojek, svárů
Fyzické oddělení uživatelů	Velké množství vláken
Jednoduché rozšíření sítě	

Tab. 3.1: Výhody, nevýhody AON.

Popisovaná skupina sítí nabývá v posledních letech na významu, a to díky možnosti připojení většího počtu koncových uživatelů na větší vzdálenosti. Jedinou za to velmi výraznou nevýhodou je cenová náročnost při zavádění technologie do provozu (hlavně její aktivní prvky). Mezi tuto skupinu můžeme zařadit standardy SPON či L-R PON.

### 3.3 Pasivní optické sítě PON

Pasivní optická přístupová síť PON je tvořena sdíleným optickým vláknem, na které je připojeno větší množství koncových uživatelů. Jedná se tedy o spojovací topologii typu P2MP. V odborné literatuře se můžeme setkat také s anglickým názvem „pure PON“. Jak již název napovídá, ve struktuře sítě se nenacházejí žádné aktivní prvky kromě koncových jednotek OLT a ONT/ONU. Optický signál, který je vysílán ze síťového terminálu OLT, se dělí v pasivním děliči (splitteru) na jednotlivé dílčí signály a ty posléze putují do koncových jednotek ONT/ONU. Děliče se ve struktuře sítě umísťují v co možná nejmenší vzdálenosti od koncových uživatelů, jelikož zatěžují trasu přidaným vložným útlumem. Parametr, který definuje množství uživatelů připojených k děliči, nazýváme rozbočovací poměr (1:N). Hodnoty rozbočovacího poměru se liší od použitého standardu, většinou však nabývá velikosti 1:32; 1:64 [4]. Přenos datových a hovorových signálů se uskutečňuje ve vyhrazených kanálech o vlnových délkách 1490 nm pro směr downstream a 1310 nm pro směr upstream. Je zavedeno i třetí pásmo o vlnové délce 1550 nm, ve kterém probíhá přenos překrývaného vysílání kabelové televize (CATV) pro směr downstream [4]. Nevýhodou PON sítě je agregace poskytované konektivity mezi jednotlivé koncové uživatele, složitější řešení garance kvality služeb a menší překlenutelná vzdálenost mezi OLT a ONT/ONU. Shrnutí výhod a nevýhod líčí Tab. č. 3.2.

Výhody	Nevýhody
Nižší cena na výstavbu a provoz	Složitější řízení kvality služeb
Větší spolehlivost (nejsou aktivní prvky)	Agregace konektivity mezi koncovými uživateli
Některé standardy symetrický kanál	Menší dosažitelná vzdálenost
Efektivněji využito kapacity vlákna	Některé standardy nesymetrický kanál
Menší množství vláken, konektorů, svárů, atd	Omezená šířka přenosového kanálu
Jednoduché rozšíření sítě	

Tab. 3.2: Výhody, nevýhody PON.

V dnešní době ještě stále převažují optické přístupové sítě založené na časovém sdružování kanálů TDM nad ryzí optickou sítí typu WDM-PON. Jedná se především o standardy APON, BPON, GPON, EPON a nově též 10G-EPON, XG-PON, které se od sebe liší použitým protokolem na spojové (druhé) vrstvě modelu RM-OSI, přenosovými rychlostmi, nároky na parametry distribuční části sítě atd.

### 3.3.1 APON/BPON

APON (ATM PON) – jedná se o první ze standardu využívaných v pasivních optických sítích, který byl standardizován v roce 1998 doporučením ITU-T G. 983.1. V dnešní době je spíše nahrazován standardem BPON (Broadband PON). K přenosu informace je zde použito asynchronního protokolu ATM. Umožňuje použít dvě základní varianty přenosových rychlostí: symetrický přenos o rychlosti 155,52 Mb/s a asymetrický přenos o rychlostech ve směru downstream 622,08 Mb/s, ve směru upstream 155,52 Mb/s. Později byl dodatečně doplněn symetrický přenos o rychlosti 622,08 Mbit/s [6]. Standard APON se dočkal úprav definovaných v doporučení označeném ITU-T G. 983.3 z roku 2001 a používá se pro něj zkratka BPON.

Tyto standardy nabízejí dvě varianty přenosu k oddělení směru downstream a upstream. Jedná se o nasazení dvou separátních vláken pro každý směr jedno, nebo zavedení jednoho vlákna s vlnovým dělením. Varianta se separátními vlákny je ekonomicky náročným řešením, jelikož je zapotřebí použít dvojnásobný počet vláken jakož to dalších optických prvků (konektory, splitters, atd.), proto se jeví použití jednoho vlákna pro oba směry ideálním. V takovém případě se použije vlnového dělení, kdy pro směr downstream je využito pásmo 1480 nm – 1500 nm a pro směr upstream 1260 nm – 1360 nm [6]. Záměrně jsou vlnové délky zvoleny s ohledem na charakteristiku konvečních optických vláken, a to z důvodu nasazení méně kvalitních optických zdrojů (nižší cena).

### 3.3.2 GPON

Jedná se o přímého nástupce předešlých standardů APON/BPON. GPON neboli Gigabit Capable PON byl specifikován v doporučení ITU-T G. 984.1, které pochází z roku 2003. K přenosu informace je taktéž využito asynchronního protokolu ATM a nově vyvinutého protokolu GEM (GPON Encapsulation Method). GEM protokolu je použito pro přenos GPON rámců proměnné délky. ATM buňky, GEM rámce nebo jejich části, jsou přenášeny v jednom společném rámci s pevně definovanou délkou 125  $\mu$ s, což umožní nasazení paketově orientovaných služeb typu Ethernet či IP [7].

Jak již bylo zmíněno, proměnné rámce GEM můžeme rozdělit na menší části, tak aby šli zapouzdřit do přenosových rámců pevné velikosti. Tato skutečnost rozdělení na menší části GEM rámců má výhodu v lepší práci s QoS, kdy pakety z vyšší úrovně priority můžeme zpracovávat rychleji, než je tomu u EPON, který k přenosu informace používá standardního Ethernetového rámce. Jak již název napovídá, přenosové rychlosti GPON překračují gigabitovou hranici. Symetrická varianta nabízí přenosovou rychlost 1,244 Gbit/s nebo 2,488 Gbit/s, případně asymetrická varianta ve směru downstream 2,488 Gbit/s, ve směru upstream 1,244 Gbit/s. Kvůli zachování kompatibility s APON/BPON standard GPON podporuje přenosové rychlosti 155,52 Mbit/s a 622,08 Mbit/s symetricky [6][7].

Stejného principu jako u APON/BPON je použito pro oddělení směru přenosu, kdy pro vlnové dělení jsou použity tyto vlnové délky: downstream 1260 nm – 1360 nm, upstream 1480 nm – 1500 nm. Větší toleranční rozmezí ve směru upstream je zavedeno z důvodu použití méně kvalitních optických zdrojů v jednotce ONT a z toho plynoucí nižší ceny zmíněných jednotek. Zdroje objevující se v těchto zařízeních vykazují značnou závislost vysílané vlnové délky optického signálu na teplotě, vlhkosti a stáří [7].

### 3.3.3 EPON

Standard EPON (Ethernet PON), někdy také označován jako GEAPON, kde G reprezentuje gigabitovou přenosovou rychlost na fyzické vrstvě. K přenosu informací využívá standardních

Ethernetových rámců o definované délce 2 ms. Společnost IEEE jej navrhla v roce 2004 pod označením IEEE 802.3ah. Hlavním cílem bylo zavedení standardu Ethernet až ke koncovým uživatelům a tím zjednodušit následné navázání lokálních sítí [8]. Ve výše uvedeném standardu jsou definovány dvě útlumové třídy pod označením 1000BASE-PX10 a 1000BASE-PX20, tedy EPON typ 1 a typ 2. Rozdíl mezi typem 1 a 2 je pouze v maximálním počtu připojených uživatelů a v maximálním fyzickém dosahu sítě. Typ 1000BASE-PX10 dosahuje fyzické vzdálenosti sítě 10 km s 16 možnými připojenými uživateli a typ 1000BASE-PX20 dosahuje fyzické vzdálenosti 20 km s 32 koncovými uživateli. Ostatní parametry jsou pro oba typy standardu EPON shodné. [6]

Tak jako v předcházejících standardech hlásících se do rodiny PON je pro oddělení provozu možno použít dvou separátních vláken, případně vlnového dělení, kdy každý směr provozu má svoji odlišnou vlnovou délku. Pro směr downstream se jedná o rozsah 1480 nm – 1500 nm a pro opačný směr upstream je to 1260 nm – 1360 nm. Přenosová rychlost stanovená standardem má hodnotu 1,25 Gbit/s a to pro oba směry.

Ve směru downstream jsou vysílány jednotkou OLT kontinuální časové multirámce, ve kterých se nacházejí jednotlivé příspěvky pro všechny koncové jednotky ONT/ONU. Tento multirámec je vytvořen za pomoci TDM a díky pasivním děličům umístěným na trase se v nezměněné podobě dostává do všech koncových jednotek. V nich posléze dochází k odfiltrování jen té části rámce, která je určena konkrétní koncové jednotce. V opačném směru je zaveden systém vyhrazených vysílacích intervalů pro zajištění bezkolizního provozu. Ve výsledném vysílacím multirámcu mají navíc koncové jednotky k dispozici ochranný interval [8]. Standard EPON je primárně určen pro síť založená na topologii P2MP, nic méně za splnění určitých podmínek jej můžeme emulovat v sítích preferujících topologii P2P.

### 3.3.4 10G-EPON

Mezi přímé nástupce EPON standardu jistě patří ne příliš rozšířená varianta Turbo EPON, která pochází z roku 2007 a garantovala přenosovou rychlost 2,5 Gbit/s. Většího rozmachu se dostalo standardu 10G-EPON, který byl standardizován roku 2009 pod označením IEEE 802.3av. Snahou vývojářů bylo, aby tento standard mohl na optické přístupové síti koexistovat již s provozovanou EPON. Nejedná se tedy jen o zpětnou kompatibilitu známou u přechodu BPON – GPON, ale o koexistenci dvou standardů na jedné síti současně.

Sítě využívající tohoto standardu opět můžou pracovat ve dvou režimech symetrickém a asymetrickém. V symetrickém režimu přenosová rychlost nabývá hodnoty 10,3125 Gbit/s v obou směrech. V asymetrickém režimu je pro směr downstream vyčleněna přenosová rychlost 10,3125 Gbit/s, v opačném směru je to 1,25 Gbit/s. [6] Nesmírnou výhodou tohoto standardu je, že v jedné přístupové síti lze kombinovat pro jednotlivé koncové jednotky ONT/ONU symetrický i asymetrický přenos.

Směrové oddělení přenosu vychází z předešlých doporučení, je tedy i v 10G-PON řešeno pomocí vlnového dělení. Ve směru downstream je pro symetrickou a asymetrickou variantu vyhrazeno pásmo s vlnovými délkami 1575 nm – 1580 nm a ve směru upstream je to pro asymetrickou variantu 1260 nm – 1360 nm a při využití symetrické varianty 1260 nm – 1280 nm. [9]

### 3.3.5 XG-PON

Podobně jako EPON, který měl nástupce ve standardu 10G-EPON, tak i varianta GPON má svého 10 gigabitového následovníka označovaného XG-PON (eXGigabit PON). Tato varianta z roku 2010 je specifikována v doporučení ITU-T G. 987. Snaha vývojářů směřovala nejenom k navýšení přenosové kapacity standardu, ale i ke zpětné kompatibilitě s předchozí verzí protokolu GPON. Nejvýznamnější inovace v XG-PON se dostalo zapouzdřovacímu protokolu XGEM, který vychází ze starší verze GEM. Jeho adresní pole se rozšířilo a umožnilo tak adresaci většího počtu koncových jednotek ONT/ONU (teoreticky až 256 jednotek). [9]

Současně s novou variantou XG-PON byla vypracována i koncepce navazujících pasivních optických sítí, které tak byly rozděleny do dvou směrů – NGA1 (Next Generation Access 1) a NGA2 (Next Generation Access 2). Úkolem NGA1, kam spadá i XG-PON je udržení zpětné kompatibility se stávajícími a předešlými generacemi PON vydávanými institucí ITU-T. Zatím co NGA2 jde cestou plného využití vlnového multiplexu (CWDM, DWDM), popřípadě kombinací časového dělení TDM a vlnového dělení xWDM. V NGA2 se uvažuje o sdílené přenosové rychlosti 40Gbit/s (možné řešení: 4 vlnové délky po 10 Gbit/s, nebo 40 vlnových délek po 1 Gbit/s). Je tedy zřejmé, že v NGA2 se nepočítá s kompatibilitou předchozích variant.[9]

Přenosová rychlost protokolu XG-PON byla nadefinována asymetricky, pro směr downstream 9,95328 Gbit/s a pro směr upstream 2,48832 Gbit/s. V rámci zachování koexistence s předchozími variantami bylo nutné pozměnit vlnové délky určené pro oddělení směrů přenosu. Směr downstream nabývá rozmezí vlnových délek 1575 nm – 1580 nm a pro směr upstream nabývá hodnot 1290 nm – 1330 nm. Stejného pásma, jako u ostatních standard je využito pro přenos TV signálu (1550 nm – 1560 nm). [9]

Celkové porovnání všech zmíněných standardů uvádím v přehledné Tab. č. 3.3. Veškeré uvedené parametry by měly mít jasný význam. Snad jen doplním rozdíl mezi fyzickým a logickým dosahem sítě. Fyzický dosah sítě definuje maximální vzdálenost v optické distribuční síti ODN s přihlédnutím k fyzikálním omezením použitých základních optických zdrojů a detektorů, zatím co logický dosah sítě definuje maximální vzdálenost mezi jednotkou ONU/ONT a OLT bez uvážení fyzikálních omezení. [4]



Název	APON	BPON	GPON	EPON	10G-EPON	XG-PON
	ATM PON	Broadband PON	Gigabit Capable PON	Ethernet PON	10 Gigabit EPON	eXGigabit PON
Standard	ITU-T G.983.1	ITU-T G.983.3	ITU-T G.984.1	IEEE 802.3ah	IEEE 802.3av	ITU-T G.987.1
Rok	1998	2001	2003	2004	2009	2010
Max. vzdálenost	20	20	20	20	20	20
	20	20	60	20	20	60
Max. přenosová rychlost	622,08	1244,16	1244 / 2488	1250	10312,5	9953,28
	155,52	622,08	1244 / 2488	1250	103125 / 1250	9953,28
Max. rozbočovací poměr	1:32	1:32	1:64	1:32	1:32	1:156
Protokol na spojovací vrstvě RM-OSI	ATM	ATM	ATM/GEM	Ethernet	Ethernet	XGEM
Vlnová délka	1480 – 1500	1480 – 1500	1480 – 1500	1490 ± 10	1575 – 1580	1575 – 1580
	1260 – 1360	1260 – 1360	1260 – 1360	1310 ± 50	1260 – 1280 1260 – 1360	1260 – 1280
Tx Laser	DFB	DFB	DFB	DFB	DFB	DFB
Rx Detektor	PIN	PIN	PIN	APD / PIN	APD / PIN	APD / PIN
Šifrování	AES	AES	AES	volitelné	volitelné	AES

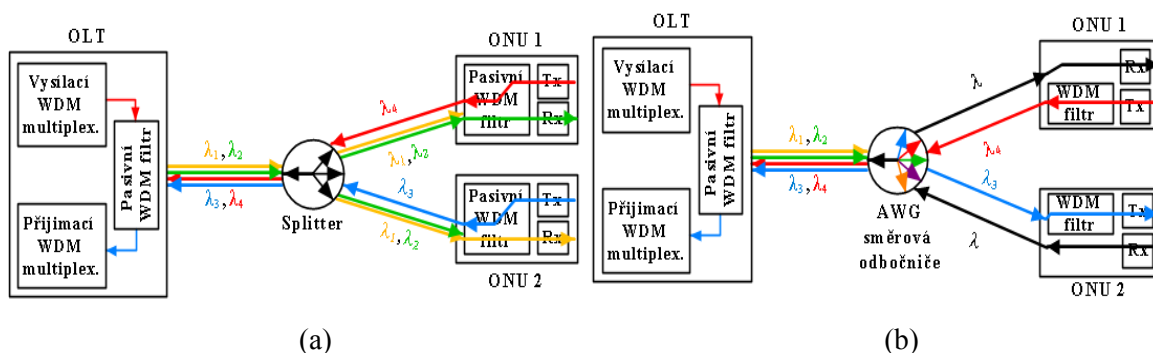
Tab. 3.3: Srovnání standardů PON využívajících TDM.

### 3.3.6 WDM -PON

Další generace v optických přístupových sítích, která perspektivně využívá přenos pomocí vlnového multiplexu WDM, tedy umístění většího množství oddělených vlnových délek do společného optického vlákna, nese označení WDM-PON. Jedná se o přímého generačního nástupce sítí založených na časovém dělení TDM, které se čím dál víc blíží ke své pomyslné výkonnostní hranici. Teoretické návrhy přenosu více vlnových délek na jednom vlákně se tradují do 70 let minulého století, avšak až nynější rozvoj podpůrných technologií (zdrojů, splitterů, atd.) umožnil nasazení v reálné síti. WDM-PON je systém, který uplatňuje vlnový multiplex CWDM z důvodu nižších pořizovacích nákladů. Je však otázkou času, kdy se začne používat novější varianta DWDM (více o xWDM naleznete v kapitole č. 2).

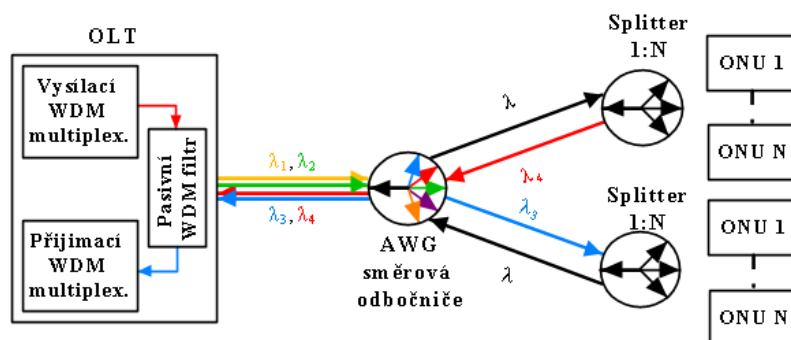
Typy existujících realizací technologie WDM-PON [10]:

- První možnost počítá pouze s pevně přidělenými vlnovými délkami individuálně všem koncovým jednotkám ONT/ONU. Například při připojení 2 koncových jednotek bude v sestupném směru použito 2 vlnových délek ( $\lambda_1$ - $\lambda_2$ ). Pasivní rozbočovač (splitter) stejně jako u předešlých standardů provede pouze rozdělení optického signálu do všech odchozích směrů a v koncové jednotce pomocí pevně definovaného vlnového filtru si vydělí svoji určenou nosnou vlnovou délku. V opačném směru bude mít každá koncová jednotka přidělenou svou individuální vysílací vlnovou délku ze souboru  $\lambda_3$ - $\lambda_4$ , na které budou odesílat odchozí datové toky. Z hlediska architektury sítě se jedná o soubor přípojek typu bod-bod. Velkou nevýhodou této varianty je bezpečnost. Jelikož na jakékoli koncové jednotce ONT/ONU lze odposlouchávat celý provoz na síti v sestupném směru, proto je nutné zajistit šifrování odpovídajících příspěvků. Další výrazný nedostatek je v nepružnosti sítě ke změnám. Pokud chceme vyměnit koncovou jednotku ONT/ONU, musíme mít k dispozici  $n$  různých koncových jednotek (tolik jednotek, kolik je účastníků v síti), nestačí nám jedna univerzální.
- Jako druhá možnost se nabízí místo pasivního rozbočovače využít směrových odbočnic na bázi vydělování vlnových délek pomocí metody AWG. V sestupném směru od OLT přichází opět optický signál ve formě vlnového multiplexu nosných pro jednotlivé koncové jednotky ONT/ONU. Pomocí AWG směrové odbočnice jsou vyděleny jednotlivé vlnové délky do odpovídajících směrů a ke koncové jednotce se již šíří nosné v separátních vláknech na téže vlnové délce. V opačném směru zůstává princip stejný jako v prvním případě. Tedy, že každá koncová jednotka ONT/ONU vysílá na odlišné vlnové délce. Výhodou této varianty je využití AWG odbočnice místo pasivního rozbočovače, která způsobuje menší vložný útlum okolo 5 dB (nezávisí na počtu vlnových délek). Odstranění pasivních filtrů na vstupu koncových jednotek, taktéž vede k snížení celkového útlumu.



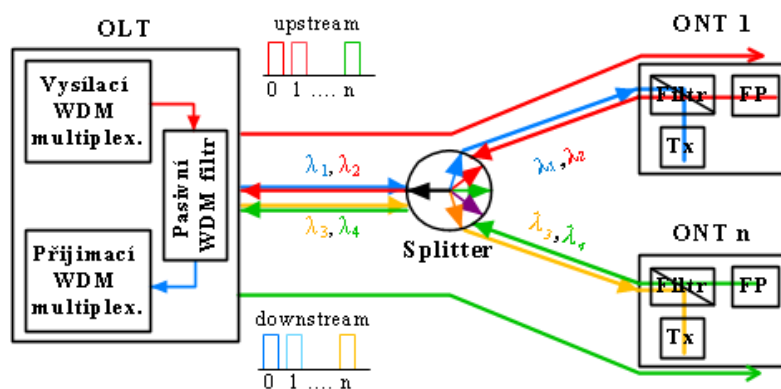
Obr. 3.3: (a) WDM-PON s pevně přiřazenými individuálními vlnovými délkami. (b) WDM-PON s využitím směrové odbočnice typu AWG místo pasivního rozbočovače.

- Tři možná varianta WDM-PON je založena na kombinaci AWG a klasického pasivního rozbočovače, případně kaskádního řazení. Tato varianta používá vydělování optického signálu na základě vlnových délek (pomocí AWG) ve spolupráci s časovým dělením (časových úseků v splitteru). Dosahuje se tak maximálního využití celého přenosového pásma. Použití univerzálních koncových jednotek a volitelných vlnových délek navíc umožňuje přidělovat kanály na základě aktuální potřeby a požadavků. Tento mechanismus se označuje jako DWA (Dynamic Wavelength Assignment).



Obr. 3.4: WDM-PON s využitím kombinace AWG a splitterů.

- Poslední, neméně zajímavou variantou, je možnost použití odlišných ONT jednotek. V této variantě se opět použije principu AWG odbočnice v kombinaci s již zmíněnou ONT jednotkou. Tato jednotka je vybavena FP (Fabry-Pérot) laserem opticky zavěšeného na stimulační vlnové délce přicházející od AWG. [11] Optický paprsek přicházející na vstup ONT zde se oddělí příchozí směr ve filtru a pokračuje dále do přijímací části ONT. Další oddělená část světelného paprsku pokračuje přes filtr na FP laser. V FP laseru dojde díky zavěšení na stimulovanou vlnovou délku ke změně spektra tohoto FP laseru. Z výchozího stavu, který byl tvořen periodickými vlnami, se změní na spektrum s úzkou spektrální čarou, díky tomu je možné FP laser použít jako vysílač u WDM-PON. Jinými slovy FP laser se sám naladí na odpovídající příchozí vlnovou délku, z toho vyplývají výhody této varianty a to úspora při řízení skladových zásob (není potřeba  $n$  jednotek, jako u první varianty, stačí nám jedna jednotka).



Obr. 3.5: WDM-PON s využitím AWG odbočnice a FP laseru. [11]

### 3.4 Další generace optických přístupových sítí

Dalším principem použitelným zejména pro zvyšování překlenutelné vzdálenosti, případně zvětšení rozbočovacího poměru, je implementovat aktivní zesilovací prvky do optické trasy. Díky tomuto faktu by se již nejednalo o čistě pasivní optickou síť, na druhou stranu vhodně umístěné zesilovací prvky by umožnily překlenout vzdálenost 100 km, nebo za pomoci vlnového dělení připojit v rámci jedné sítě až několik set koncových uživatelů. Do této skupiny optických přístupových sítí lze zařadit technologie SPON, L-R PON nebo hybridní DWDM-TDM L-R PON. V kapitole jsem čerpal z následujících zdrojů [12].

#### 3.4.1 SPON

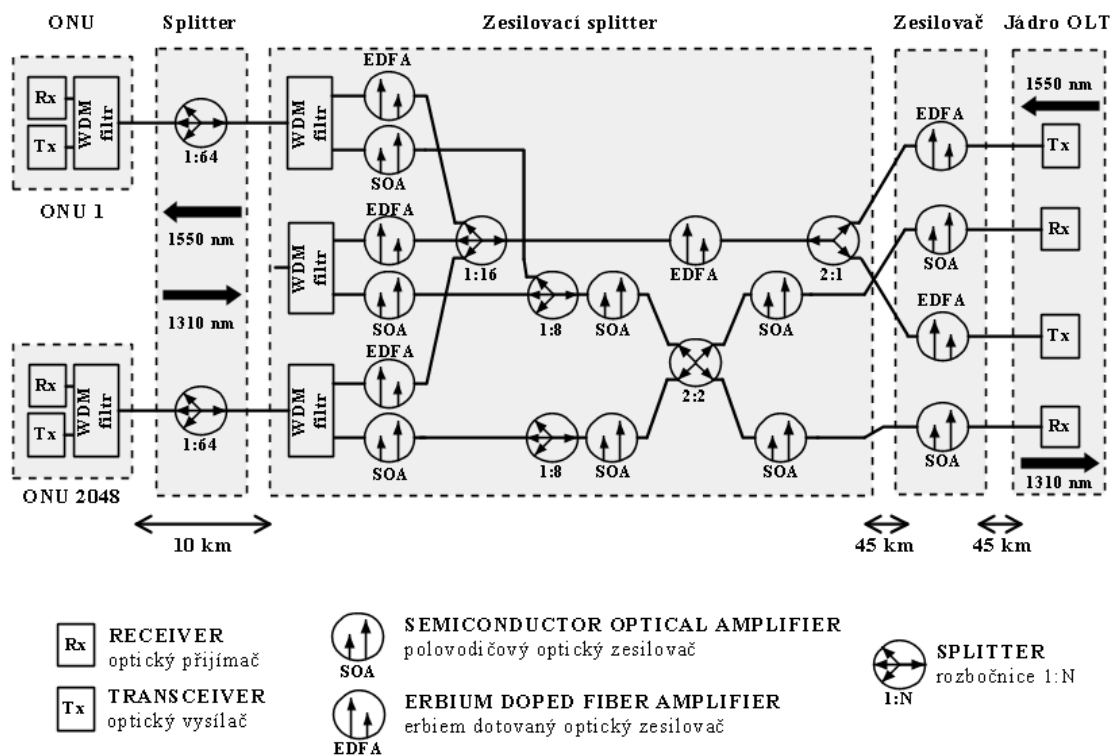
Technologie Super PON vyvinulo konsorcium nesoucí označení PLANET (Photonic Local Access Network), jejímž hlavním úkolem bylo vytvoření ekonomicky efektivní, komplexní služby přístupové sítě. Na začátku svého úsilí si definovali konkrétní hodnoty parametrů optické sítě, kterých chtěli během vývoje SPON dosáhnout. Stanovili, že překlenutelná vzdálenost bude 100 km a maximální rozbočovací poměr 1:2048, jako vycházející standard zvolili širokopásmovou PON (BPON).

Je zřejmé, že navýšení základních parametrů optické sítě vede v tomto případě k enormnímu nárůstu útlumu celé optické trasy, proto pro zamezení ztrát v SPON zavedli optické zesilovače v obou navazujících směrech. Ve směru downstream bylo zvoleno ekonomicky efektivní řešení, a to navýšení vysílacího výkonu v jednotce OLT. Použité řešení má výhodu v tom, že do páteřního vlákna je navázán dostatečně silný optický signál, který je ještě umocněn použitými optickými zesilovači v systému. Díky tomu je možné dosáhnout dostatečné úrovně optického signálu na straně přijímače ONU jednotky.

V opačném směru (upstream) nastal problém ve stanovené podmínce, že hodnota parametru SNR (odstup signálu od šumu) bude vyšší než 18,6 dB. Kvůli nežádoucí vlastnosti optických zesilovačů tzv. ASE, lze dosáhnout pouze polovičního dělicího poměru (1:1024) pro definovaný parametr SNR. Aby vývojáři splnili svůj původní záměr (rozbočovací poměr 1:2048), museli vytvořit novou součástku tzv. zesilovací splitter. Místo umístění mezi splitteru má tento druh splitteru, zařazený optické zesilovače paralelně mezi splitterové fáze (dosáhneme snížení ztrát splitteru). Nicméně, když umístíme několik optických zesilovačů paralelně, prohloubíme tím vliv celkové ASE. Každý optický zesilovač produkuje vlastní ASE, která je posléze zkombinovaná s ostatními ASE a splitter slouží ve směru upstream jako slučovač (pro ASE).

Tento jev je znám pod anglickým názvem „noise funneling“, proto byli vývojáři SPON nuceni realizovat složité vtokové protokoly, které snížily hodnotu „noise funneling“ pouze při sepnutí optického zesilovače, kdy je nutné zesílit optický signál.

Přenosová rychlost ve směru downstream byla navýšena z původních 622 Mb/s (BPON) na 2,5 Gb/s. V opačném směru dosáhla přenosová rychlost hodnoty 311 Mb/s oproti 155 Mb/s specifikované ve standardu BPON. Jako technika sdružování kanálu je zde použita metoda TDM v kombinaci s WDM.



Obr. 3.6: Architektura SPON. [12]

### 3.4.2 L – R PON

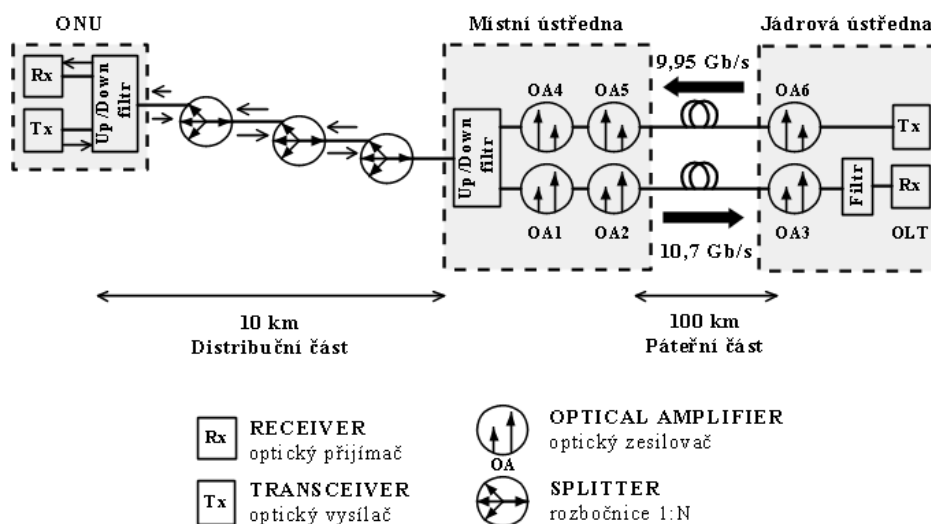
Long reach PON byla vyvinuta za účelem poskytnutí prominentního řešení modelování širokopásmových sítí, společnosti British Telecom. Parametry optické přístupové sítě dosahují následujících hodnot: překlenutelná vzdálenost je 100 km s maximálním rozbočovací poměrem 1:1024 a symetrickou přenosovou rychlostí 10 Gb/s. Těchto hodnot je dosaženo opět za pomoci optických zesilovačů. Výhoda L-R PON varianty spočívá v tom, že k provozu v obou směrech potřebujeme pouze 6 optických zesilovačů, oproti 39 zesilovačům využitých ve standardu SPON (díky poloviční hodnotě rozbočovacího poměru). Další výhoda je zcela pasivní úsek mezi ONU jednotkou a „místní ústřednou“ (dále jen distribuční část), v tomto úseku se nacházejí veškeré rozbočovací prvky.

První sada optických zesilovačů byla umístěna ihned po splittrech v „místní ústředně“, není tedy nutné řešit problémy s paralelním řazením optických zesilovačů, jak tomu bylo u SPON. „Místní ústředna“ se jeví jako ideální pro umístění optických zesilovačů, jelikož je zde zaveden přístup k elektrické energii. Distribuční část má veliký útlum 40 dB, což má za následek velmi nízkou úroveň optického signálu v „místní ústředně“. Pro vyrovnání této ztráty byla použita dvoustupňová zesilovací fáze. První fáze se skládá z nízkošumového předzesilovače, který slouží

k zvýšení parametru SNR. Druhý stupeň poskytuje dostatečné zesílení signálu, aby překlenul úsek mezi „místní ústřednou“ a OLT jednotkou (dále jen páteřní část).

V místě umístění OLT jednotky bylo zapotřebí použít další optický předzesilovač, jenž kompenzuje ztrátu páteřní části (37 dB). Při použití předzesilovače, který zesílí všechny složky optického spektra, tedy i nežádoucí šum, se na optickém přijímači objeví vysoká hodnota bitové chybovosti (BER – bit error rate), proto bylo nutné umístit před optický přijímač 2 nm optický filtr. Nicméně, použití optického filtru sebou nese nevýhodu v tom, že musíme přesně specifikovat vlnovou délku vysílače, aby se zajistil průchod přesně specifikované vlnové délky optickým filtrem. Bohužel vlnová délka laseru je teplotně závislá, proto musíme zajistit, aby nevznikaly drifts v přenosovém pásmu, což vede k navýšení ceny ONU jednotek. Zjistilo se, že cenově efektivní řešení se jeví použít 10G ethernetové vysílače, které jsou teplotně chlazené (TEC – Thermo Electric Cooler). Nevýhoda těchto vysílačů je v tom, že byly navrženy pro krátký dosah méně než 40 km. Pro dosah 100 km a přenosovou rychlost 10 Gb/s vznikají výrazné sankce chromatické disperze v jednovidovém vlákně. Proto v L-R PON byla použita technika elektronické kompenzace disperze (EDC – Electronic Dispersion Compensation), jenž má v sobě zabudovány FIR filtry (filtr s konečnou impulzní odezvou).

EDC je dynamicky laditelný, aby umožňoval zařízením kompenzovat každou ONU jednotku, umístěnou v různých vzdálenostech od OLT bez infrastrukturních změn. Díky všem zmíněným technologiím a metodám bylo možné dosáhnout přes 100 km symetrickou přenosovou rychlost 10 Gb/s pro 1024 zákazníků, kteří používají nízkonákladový optický vysílač ONU.



Obr. 3.7: Architektura L – R PON. [12]

### 3.4.3 Hybridní DWDM - TDM L-R PON

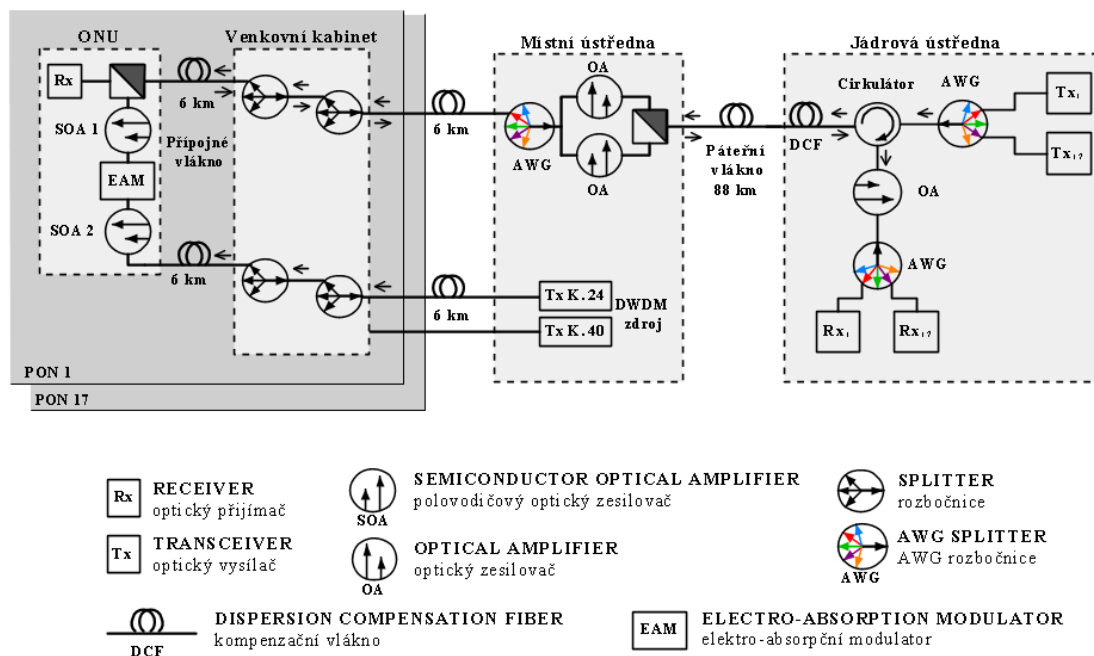
Hybridní DWDM-TDM L-R PON vyvinula firma Townsend & Talli a jedná se o novou optickou přístupovou síť zavádějící DWDM multiplex do L-R PON architektury. Tato architektura umožňuje použití většího počtu PON sítí dlouhého dosahu a velkého dělicího poměru. Každá síť pracuje na různé vlnové délce, ale všechny sdílí společnou optickou infrastrukturu. Tato konstrukce v sobě spojuje větší dosah opticky zesílených PON se zvýšeným počtem koncových uživatelů, kterou dovoluje zavedení DWDM multiplexu. DWDM se opírá o úzký optický filtr (většinou 100 GHz nebo 50 GHz), který oddělí každý jednotlivý kanál. Proto pro tuto technologii musel být zvolen vhodný vysílač zajišťující přísně specifikovanou velikost vlnové délky. Firma Townsend & Talli se rozhodla použít optický vysílač typu elektro-absorpční

modulátor (EAM), který v sobě integruje dva polovodičové zesilovače (SOA). Optické nosiče jsou generovány na centrálním místě v síti, takže máme plnou kontrolu nad vlnovými délkami vysílače. První polovodičový zesilovač byl použit pro zesílení optických nosičů na vstupu ONU jednotky a druhý byl použit pro zesílení signálu po modulaci EAM.

Celková trasa sítě (100 km) od ONU jednotky k OLT jednotce je rozdělena do tří dílčích úseků. Od ONU jednotky k venkovnímu kabinetu je napojená vláknová sekce délky 6 km. Další 6 km je délka od venkovního kabinetu do „místní ústředny“. Zbývajících 88 km je vyhrazeno pro páteřní vlákno. V distribuční části mezi ONU jednotkou a „místní ústřednou“ jsou připojeny jednotlivé PON sítě. Každá PON síť má vyčleněnou speciální vlnovou délku pro svůj upstream a downstream. Všechny PON sítě se pak spolu v „místní ústředně“ spojí do jednoho páteřního vlákna pomocí DWDM multiplexeru/demultiplexoru.

Oba směry (up a down stream) používají 100 GHz rozestup mezi kanály, který rozděluje C-pásmo na polovinu. Vlnové délky od 1529 nm do 1541 nm jsou přiděleny downstreamu a vlnové délky od 1547,2 nm do 1560,1 nm jsou přiděleny upstreamu. Celkem lze použít 17 kanálů, což umožňuje nasadit 17 PON sítí s 5 nm ochranným pásmem mezi up a downstreamem. „Místní ústředna“ obsahuje centrální DWDM zdroj optických nosičů a optický zesilovací stupeň. Signál ve směru upstream prochází optickým zesilovačem a poté putuje do demultiplexoru každé PON v OLT pomocí AWG splitteru. Downstreamový signál je multiplexován v AWG splitteru a poté je navázán do páteřního vlákna.

Tato architektura podporuje symetrickou přenosovou rychlost 10 Gb/s na vzdálenost 100 km. Počet připojených koncových uživatelů se liší podle počtu připojených PON sítí. Při provedení 17 PON sítí a předpokladu, že každá z nich má rozbočovací poměr 1:256, se celkový počet uživatelů na síti pohybuje kolem 4352, kdy každému z nich je garantovaná minimální přenosová rychlost 39 Mb/s (10 Gb/s děleno 256 uživateli).

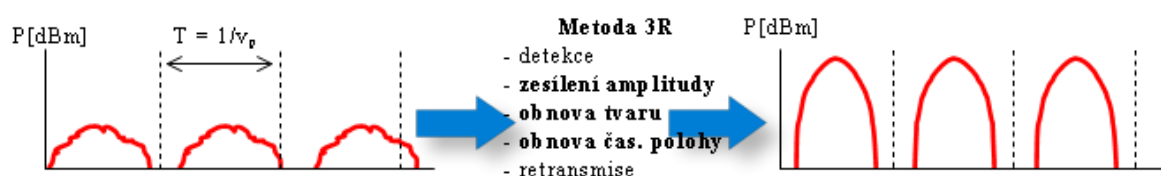


Obr. 3.8: Architektura hybridní DWDM-TDM L-R PON. [12]

## 4 Optické zesilovače

Optickou přenosovou trasu v podstatě limitují dva nejvýraznější faktory, kterými jsou útlum a disperze. Útlum vede ke změně úrovně optického signálu, což nám omezuje délku přenosové trasy. Zatím co disperze působí negativně na šířku pulsu a limituje tím šířku přenosového pásma v optickém vlákně (přenosovou rychlost). Je tedy zřejmé, že s rostoucí délkou optické trasy se prohlubuje i vliv zmíněných nežádoucích faktorů, proto musíme po určitém úseku optické trasy přenášený optický signál regenerovat.

Jednou z technik, jak obnovit původní tvar optického signálu, je metoda tzv. 3R Regeneration (re-transmission, re-timing, re-shaping). Metoda zahrnuje následující procesy: detekce (konverze foton-elektron), elektrické zesílení amplitudy, obnova taktu, obnova tvaru pulsu a retransmise (konverze elektron-foton), (viz Obr. č. 4.1). [13] V dnešní době je metoda 3R málo používanou technikou zesílení signálu, a to kvůli svým nevýhodám. První nevýhoda spočívá v přerušení optické linky, a tudíž není opticky transparentní. Druhou nevýhodou je proces regenerace, který závisí na formátu signálové modulace a přenosové rychlosti, není tedy elektricky transparentní. Poslední nevýhoda spočívá ve složitosti regenerátorů, které jsou často situovány v obtížném terénu (např. podmořské dno) a snižují celkovou spolehlivost sítě. Proto v optických systémech, kde je limitujícím faktorem útlum, jsou regenerátory nahrazeny průběžnými optickými zesilovači. Zesilovače plní pouze jednu funkci, a to zesílení optického signálu. Jedná se tak o mnohem spolehlivější a levnější řešení.



Obr. 4.1: Princip metody 3R.

Ideální optický zesilovač má být plně kompatibilní s optickým jednovlákenným vlákem, dodávat dostatečný zisk a být opticky transparentní (nezávislý na parametrech vstupního signálu). Optické zesilovače lze rozdělit do dvou základních skupin. První skupina obsahuje zesilovače založené na principu opticky vláknovém (OFA). Do druhé skupiny se řadí polovodičové optické zesilovače (SOA). Nejrozšířenější typ jsou zesilovače OFA, ale v dnešní době se dostává většího zájmu i optickým zesilovačům typu SOA.

Obě skupiny zesilovačů jsou limitovány dvěma nepříjemnými parametry a to šumem a saturačním výkonem. Každý zesilovač jak typu OFA tak SOA vnáší do trasy vlastní šum, známý jako ASE (Amplified Spontaneous Emission). Oproti tomu saturační výkon omezuje maximální výstupní výkon zesilovače. Na druhou stranu zmíněná vlastnost v podobě saturačního výkonu je užitečná v případě, kdy potřebujeme výstupní výkon nějakým způsobem omezit, jedná se o tzv. optické omezovače. Dále je vhodné si uvědomit, že velikost zisku zesilovače je závislá na vlnové délce a vstupní signálové úrovni. Potom pro výstupní energii ze zesilovače platí následující obecná relace:

$$E_{out}(t) = G \cdot E_{in}(t) + n(t) \quad [W], \quad (4.1)$$

kde:  $G[-; dB]$  zesílení popřípadě zisk zesilovače,  $E_{in}(t) [W]$  vstupující signál do optického zesilovače a  $n(t)$  přidaný šum často označován, pouze jako ASE.



## 4.1 Použití optických zesilovačů

Zesilovače můžeme použít v optickém komunikačním systému na různých místech podle jejich zesilovacích vlastností. První možnost umístění je na začátku trasy, kde zesilují výkon vysílače (výkonový zesilovač). Dále jej můžeme umístit průběžně do trasy, kdy kompenzují ztráty při přenosu a na vlákne (průběžný zesilovač). Poslední možností je umístění na konci trasy, zde má za úkol zvýšit citlivost přijímače (předzesilovač).

### Výkonový zesilovač (Booster):

Jak již bylo zmíněno, booster se umísťuje bezprostředně za optický vysílač. Jeho úkolem je zesílit signál na maximální možnou úroveň, kterou lze do vlákna navázat, aniž by vznikaly v jeho struktuře nelineární jevy. Zároveň musí být uzpůsoben tak, aby dokázal zpracovat velký vstupní signál přicházející od vysílače. Takové uspořádání umožňuje výstavbu středně dlouhých tras se zvýšeným dosahem. V trase je již použito jen optické vlákno mezi vysílačem a přijímačem, a jelikož neobsahuje další aktivní prvky, jsou tyto sítě velice spolehlivé. Dále lze použít pro kompenzaci útlumu při dělení v distribuovaných optických sítích. Používají se i v systémech WDM, kdy je zapotřebí zesílit vstupní signál o různých vlnových délkách a také snižují přeslechy mezi jednotlivými kanály (díky vysoké hodnotě saturačního výkonu).



Obr. 4.2: Umístění zesilovačů v optické trase.

### Průběžný zesilovač (In-line):

Průběžný zesilovač umísťujeme do optické trasy. Jeho hlavním úkolem je zesílit utlumený vstupní signál na co nejvyšší možnou výstupní úroveň. Dochází tedy ke kompenzaci útlumu způsobeného předchozím úsekem trasy. Tyto zesilovače se někdy řadí do kaskády, aby se zvýšil zisk nebo pro dosažení lepšího průběhu spektrální křivky zisku. Hlavní výhodou jsou nezávislost na druhu modulace a přenosové rychlosti a možnost nasazení s WDM. V případě SOA je to také možnost obousměrného provozu a nízká spotřeba energie.

### Předzesilovač (Preamplifier):

Tento typ zesilovače se umísťuje na konci optické trasy těsně před přijímačem. Úkolem předzesilovače je zvýšení úrovně signálu před vstupem do demodulátoru, popřípadě přijímače (zvýší citlivost). Předzesilovač má extrémně nízký vlastní šum, čímž zlepšuje hodnotu parametru SNR před dopadem na detekční plochu přijímače, tím se sníží hodnota parametru BER optického spoje při vysokých přenosových rychlostech.

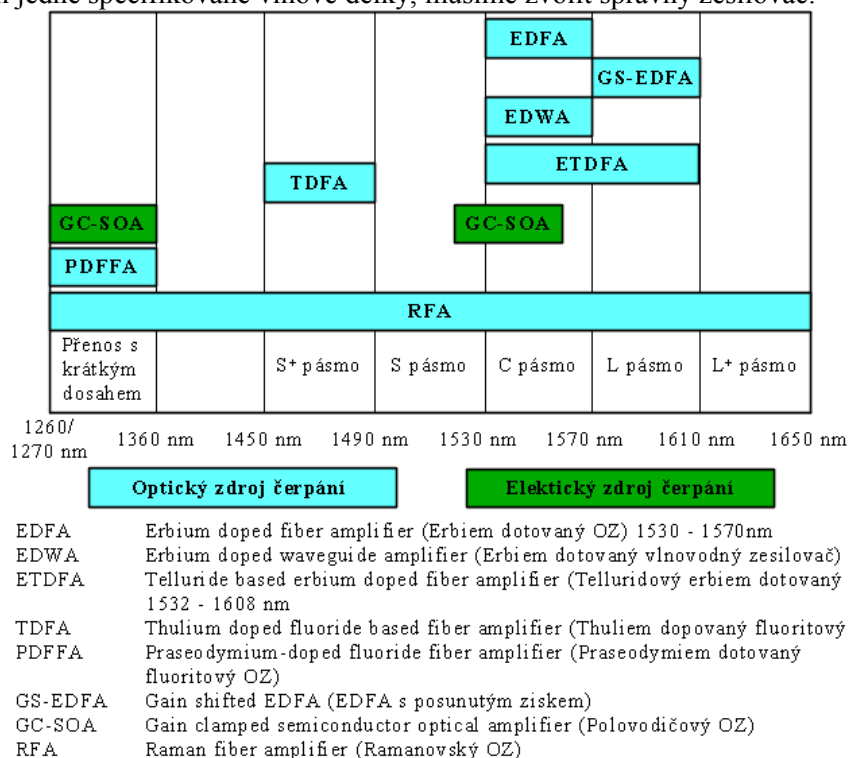
## 4.2 Optické vláknové zesilovače

Optické vláknové zesilovače vynalezl v roce 1964 jistý pan E. Snitzer, kdy vyrobil nodyiem dotovaný optický zesilovač pracující na vlnové délce 1060 nm. Délka vlákna se pohybovala kolem jednoho metru a bylo ovinuto kolem výbojky stimulující ionty neodymia. [14] Jak již úvodní slova napovídají, jedná se o zesilovač využívající dotovaného optického vlákna jako média, které poskytuje zesílení optického signálu. Rozměrově se toto vlákno podobá normálnímu jednovidovému vláknu, ale aby bylo schopné zesilovat optický signál, musí se při výrobě dotovat některým ze vzácných prvků. Volba určitého druhu dopantů má velký vliv na spektrální závislost zisku zesilovače.

Optická vlákna mohou být dopovány prvky [14]:

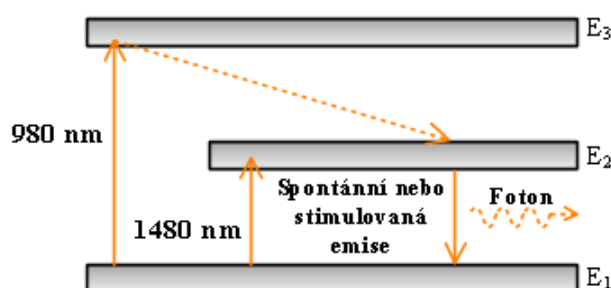
- Erbium (Er)
- Neodymium (Nd)
- Prasedymium (Pr)
- Thulium (Tm)
- Ytterbium (Yb)

Dle prvních písmen chemického prvku, který je použit při výrobě vlákna, je odvozeno i označení zesilovače (např. EDFA, PDFA, YDFA), (DFA – Doped Fiber Amplifier). Nejběžnější prvek, se kterým se můžeme v zesilovačích setkat je Erbium. Správná volba množství dopovaného prvku při výrobě má nesmírný vliv na jeho zesilovací vlastnosti. Při velké koncentraci dochází ke zhoršení účinnosti zesilovače nebo ke snížení zisku. Koncentrace dopantů se pohybuje v řádu několika stovek atomů na milion molekul primárního materiálu. Použitá látka má také vliv na pásmo, ve kterém má daný typ zesilovače nevyšší zesílení. Proto pokud chceme zesílit okolí jedné specifikované vlnové délky, musíme zvolit správný zesilovač.



Obr. 4.3: Rozdělení zesilovačů s dotovaným vláknem podle pracovní vlnové délky. [15]

Optické zesilovače s dotací mají vesměs stejný princip funkce. Využívá stimulované emise fotonů z iontů, které byly přidány do optického vlákna. Čerpací zdroj, jenž je použit polovodičový laser pracující na vlnové délce 980 nebo 1480 nm, vybudí elektrony dopantů do vyšší energetické hladiny  $E_2$  nebo  $E_3$  (záleží na vlnové délce čerpacího zdroje). Zde setrvávají jen krátký čas ( $1\mu s$ ) a samovolně bez zářivé emise sestupují do metastabilní hladiny  $E_2$ . Pokud použijeme čerpací zdroj o vlnové délce 1480 nm, vybudíme elektrony Erbiuma přímo do energetické hladiny  $E_2$ . V této hladině elektrony setrvávají přibližně 10 ms. Posléze pak spontánně nebo stimulovaně přecházejí do základního valenčního energetického pásu  $E_1$  a uvolní se při tomto přechodu foton. V případě, že stimulovaná emise převládá nad spontánní emisí a absorpcí, jinými slovy, počet elektronů v metastabilní hladině je vyšší, než počet elektronů v základním valenčním pásu  $E_2 > E_1$  (hovoříme o inverzi populace), dochází k procesu zesílení optického signálu. Zmíněný jev není v základní teplotní rovnováze dosažen, tedy nižší energetická hladina je hustěji osídlena elektrony, než hladina z vyšším energetickým potenciálem. K dosažení inverze obsazení energetických hladin, musíme dodat další energii ve vhodné podobě. Tato energie může být jak optického tak i elektrického charakteru. [1][14]



Obr. 4.4: Energetické hladiny optického vláknového zesilovače. [15]

Mezi nejvíce limitující parametry zisku optického vláknového zesilovače řadíme šum a saturační výkon.

### Šum:

Již z principu funkce OFA je jasné, že hlavní složkou šumu je tzv. zesílená spontánní emise (ASE), která má zhruba stejný rozsah jako rozsah zisku zesilovače. V dokonalém případě by měla být úroveň šumu 3 dB, ale v realu se potkáme se zesilovači s hodnotou okolo 6 až 8 dB.

Během procesu zesílení vznikají při změně energetické hladiny (metastabilní hladina → základní hladina) cílená stimulovaná emise a nechtěná spontánní emise, která je náhodnou a závisí na struktuře vlákna. Vzniklé nechtěné fotony se šíří všemi směry, kdy část těchto fotonů je navázána a posléze vedena vláknem. Uvnitř vlákna mohou tyto částice vzájemně reagovat s dopanty, a tak dochází k zesilování šumu i užitečného signálu stimulovanou emisí. Jelikož OFA zesilují obousměrně, rozeznáváme dopředný a zpětný ASE šum. Pouze dopředný ASE šum ovlivňuje celkový výkon systému, protože se spojuje s užitečným signálem a degraduje tak výkon zesilovače. ASE šum, lze popsat pomocí matematického vzorce takto: [15]

$$P_{ASE}^{OUT} = 2 \cdot n_{SP} \cdot h \cdot f_c \cdot (G - 1) \cdot \Delta B \quad [W], \quad (4.2)$$

kde:  $n_{SP} = N_2 / (N_2 - N_1)$  [–] činitel spontánní emise (souvisí s velikostí inverze populace);  $h$  [ $m^2 \cdot kg \cdot s^{-1}$ ] Planckova konstanta;  $f_c$  [Hz] frekvence optické nosné;  $G$  [–] zesílení zesilovače;  $\Delta B$  [Hz] šířka optického pásma, ve kterém měříme šum.

Saturační výkon:

Jednou ze základních podmínek pro dosažení zisku v OFA je inverze populace. Pro zopakování inverze populace je fyzikální stav, kdy v aktivním prostředí musí stimulovaná emise dominovat nad absorpcí. K tomu je zapotřebí zajistit, aby na vyšší energetické hladině bylo více nosičů než na nižší. [1]

Inverze populace je primárně určena výkonem čerpacího zdroje o specifické vlnové délce a výkonem zesílení vlnových délek. Z čehož vyplývá, že se zvětšující úrovní signálu, nebo klesajícím výkonem čerpacího zdroje se snižuje inverze populace a tím pádem i zisk zesílení. Saturační výkon tedy reprezentuje situaci, kdy při zvyšování úrovně signálu je zesilovač již nasycen a nezvyšuje dál výstupní výkon, vede ke snížení zisku zesilovače.

K dosažení co nejvýhodnějších šumových podmínek pracují OFA v oblasti saturačního výkonu, obvykle 10dB. Dosáhne se snížení míry spontánních emisí a snížení vlivu ASE. Další výhoda práce v okolí saturačního výkonu je ta, že kolísání vstupního signálu je minimalizováno na zesíleném výstupu. Velkého významu nabývá saturační výkon v zapojení zesilovače jako booster (výkonový).

Saturační charakteristika:

V optických vláknových zesilovačích je chování saturačního zisku velmi specifické. Jelikož tyto zesilovače nabývají relativně malého příčného řezu, je saturační energie velká a díky tomu může být v zesilovači uloženo velké množství energie. Tuto energii pak jednoduše uvolníme jedním krátkým impulsem. Pokud je tedy energie pulsů vyšší než hodnota saturační energie, dochází k jejich výraznému zkreslení. [14]

Šumové číslo:

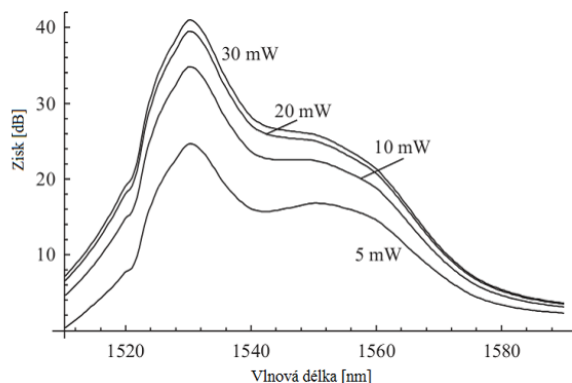
Jedná se o parametr optických zesilovačů, který udává míru degradace signálu k šumu. Tato degradace je zapříčiněna v procesu zesilování vlivem spontánní emise, kdy vznikají fotony náhodné fáze a polarizace. Šumové číslo je závislé na provozní vlnové délce, čerpacím proudem a na výkonu vstupního signálu.

**4.2.1 EDFA**

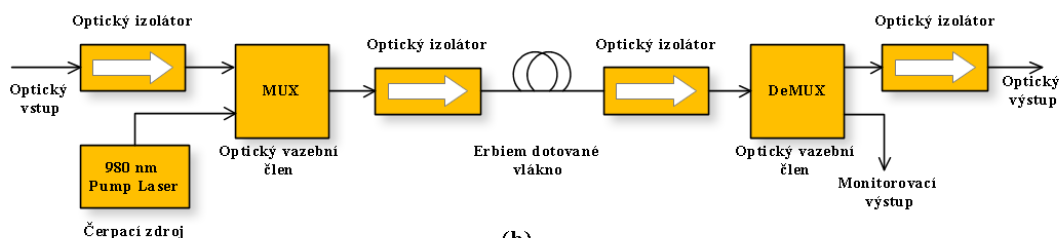
V posledních letech se jedná o jeden z nejpoužívanějších optických vláknových zesilovačů, který dokáže zesílit velký počet WDM kanálů. Zesílení se v tomto zesilovači docílí pomocí Erbiem dopovaného optického vlákna. Zisk EDFA zesilovače dosahuje nejvyšších hodnot kolem vlnové délky 1550 nm v šířce  $\pm 35$  nm. [21] Typická závislost zisku na vlnové délce je znázorněna na Obr. 4.5 (a), kdy různé křivky odpovídají různým hodnotám výkonu čerpacího zdroje. Jak již bylo zmíněno, zesilovací vlastnosti EDFA se v křemíkovém vlákně nejvíce projeví v pásmu C a L. Teoreticky lze jedním zesilovačem zesílit obě pásma, ale s tím to principem se v reálu nesetkáme. Používají se dva odlišné zesilovače, které jsou přesně dimenzovány na odpovídající pásmo. V L-pásmu nabývá závislost zisku na vlnové délce mnohem ploššího charakteru než v C-pásmu, což usnadňuje problém s odlišným zesílením jednotlivých kanálů v systémech WDM. Nicméně v L-pásmu koeficient zisku erbia dosahuje třikrát menších hodnot, než je tomu v pásmu C, proto se vyžaduje použití buď mnohem delší délky dopovaného vlákna, či vlákno s vyšší koncentrací dopantů Erbia. V každém případě je použito mnohem většího výkonu čerpacího zdroje.

Používané čerpací zdroje v EDFA: [14]

- Čerpací laser pracující na 980 nm – využívá se v systémech, kde je zapotřebí nižší šum. Útlumové pásmo je relativně úzké, ale nabývá vyšších hodnot, proto se používá laserového zdroje se stabilizátorem vlnových délek. V dnešní době nejpoužívanější čerpací zdroj.
- Čerpací laser pracující na 1480 nm – využívá se pro velmi výkonné zesilovače. Jejich útlumové pásmo dosahuje nižších úrovní, ale je podstatně širší, než u předchozího typu. Zesilovače pracující s těmito čerpacími zdroji dosahují horších šumových parametrů, ale mají lepší účinnost přeměny čerpacího výkonu na zesílený signál. Jedná se o cenově dostupné a spolehlivé zdroje.



(a)



(b)

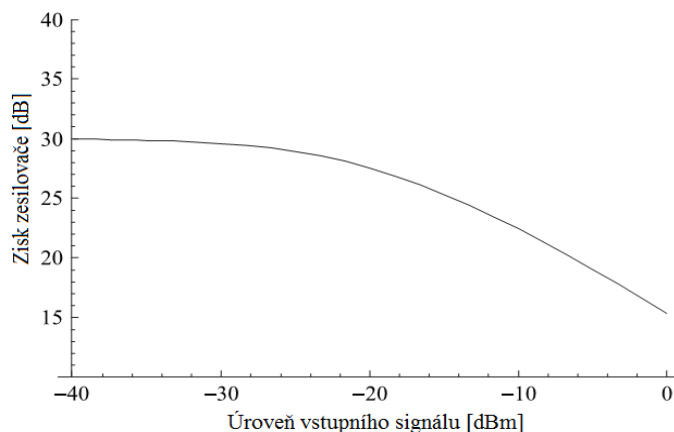
Obr. 4.5: (a) Závislost zisku zesilovače na vlnové délce pro různé hodnoty čerpacího zdroje. [21]

(b) Blokové schéma EDFA zesilovače. [15]

Důležitým hlediskem při navrhování zesilovacího systému je saturace EDFA. V závislosti na výkonu čerpacího zdroje je omezen výstupní výkon zesilovače, což má za následek, že s rostoucí úrovní signálu zesílení klesá. Toto chování lze matematicky popsat zhruba následovně: [21]

$$G = 1 + \frac{P_{\text{sat}}}{P_{\text{in}}} \ln \frac{G_{\text{max}}}{G} \quad [\text{dB}], \quad (4.3)$$

kde  $G_{\text{max}}$  [dB] je nesaturovaný zisk,  $G$  [dB] saturační zisk zesilovače,  $P_{\text{sat}}$  [W] je saturační výkon zesilovače a  $P_{\text{in}}$  [W] vstupní úroveň signálu. Pro lepší představu, jak se mění zisk zesilovače na úrovni vstupního signálu, je tu Obr. 4.6.



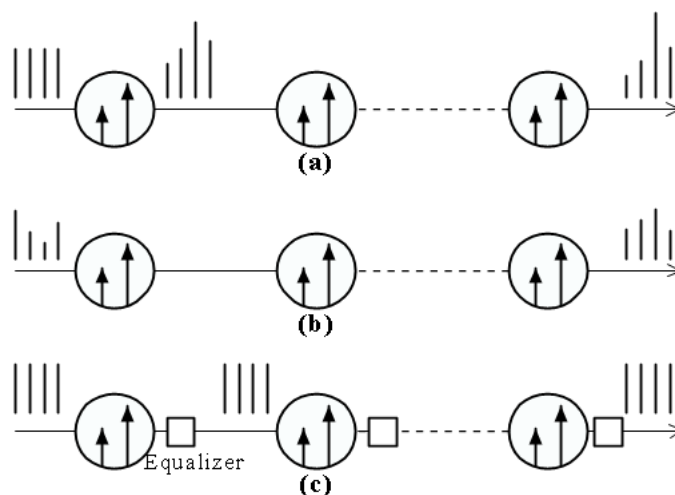
Obr. 4.6: Závislost zisku zesilovače na úrovni vstupního signálu. [21]

Dalším problémem, který se uplatňuje v reálných optických sítích dlouhých dosahů, je kaskádní řazení EDFA. Základní podmínkou, kterou musíme u tohoto řazení docílit je kompenzace ztrát vzniklých na jednotlivých úsecích. Jedním z klíčových problémů při kaskádním řazení zesilovačů je šumová složka (ASE), která se zvětšujícím počtem zapojených zesilovačů roste. Matematicky lze velikost šumu na výstupu kaskádního řazení popsat následovně: [21]

$$P_{noise}^{tot} = 2 \cdot n_{SP} \cdot h \cdot f_c \cdot \Delta B \cdot (G - 1) \cdot L/l = 2 \cdot n_{SP} \cdot h \cdot f_c \cdot \Delta B \cdot (e^{\alpha l} - 1) \cdot L/l \quad [dB], \quad (4.4)$$

kde:  $n_{SP} = N_2 / (N_2 - N_1)$  [–] činitel spontánní emise;  $h$  [ $m^2 \cdot kg \cdot s^{-1}$ ] Planckova konstanta;  $f_c$  [Hz] frekvence optické nosné;  $G$  [–] zesílení zesilovače;  $\Delta B$  [Hz] šířka optického pásma;  $L$  [m] celková délka optické trasy;  $l$  [m] vzdálenost mezi jednotlivými zesilovači;  $\alpha$  [ $dBkm^{-1}$ ] útlum vlákna.

Nasazení více zesilovačů zapojených za sebou v systémech WDM sebou nese neduhu v podobě nesymetrického zesilování jednotlivých vlnových délek (můžeme vidět na Obr. 4.5 a). Každý WDM kanál je zesilován jiným ziskem zesilovače. Následující fakt se s rostoucím počtem zapojených zesilovačů výrazně prohlubuje a má vliv na SNR pro jednotlivé WDM kanály. Pro odstranění tohoto nedostatku bylo navrženo několik technik. Jednou z technik je použití tzv. „preequalization“ a „preemphasis“, jak můžeme vidět na Obr. 4.7 (b). Na základě celkového zisku a tvaru kaskády můžeme nastavit přenášený výkon na kanál tak, aby kanály s nižším ziskem se zpracovaly s vyšší prioritou. Cílem těchto součástí je zajistit, aby všechny kanály byly přijímány s přibližně stejným SNR.[21] Druhý způsob je zavést vyrovnání v každém zesilovači, jak je vidět na Obr. 4.7 (c). Po každém úseku jsou vyrovnány výkony jednotlivých kanálů. Jednou z možností, jak toho docílit, je použití vícekanálového filtru, jako je akusticko-optický laditelný filtr (AOTF). V AOTF je každý kanál jinak utlumen použitím sady vysokofrekvenčních signálů s různou frekvencí. Nicméně AOTF vyžaduje velké množství elektrické energie a představuje další vložený útlum. [21]



Obr. 4.7: Vliv rozdílného zisku na různé vlnové délky (a) soubor kanálů se stejnou prioritou na vstupu zesilovače. Kaskádní systém bude mít naprosto odlišné úrovně a SNR. (b) Tento vliv sníží kanálové úrovně po „preequalizingu“. (c) Další způsob, jak snížit tento účinek je vyrovnání vlivu v každém zesilovači. Vyrovnání lze provést pomocí filtru uvnitř zesilovače. [21]

#### 4.2.2 PDFA

Zesilovače PDFA s dotací praseodymia pracují na stejném principu jako zesilovače EDFA. Lze je s výhodou použít k zesílení datových přenosových systémů nebo signálů CATV v pásmu 1310 nm (O-pásmo). V tomto pásmu umožňují překlenout vyšší měrný útlum optických vláken a dosahují i pro dálkové přenosy velmi nízkých hodnot chromatické disperze.[16] Nemusíme tedy nasazovat velmi drahé kompenzátory chromatické disperze.

#### 4.2.3 TDFA

V zesilovačích TDFA se používají vlákna s dotací fluoridu thuliem, které obsahují nízkou fotonovou energii. Nevýhoda takto dopovaných vláken je špatná odolnost vůči vnějším vlivům a hlavně horší výroba. Jsou také nekompatibilní se standardními telekomunikačními optickými vlákny. Jejich oblast zesílení se pohybuje v S-pásmu, což není komerčně používaným pásmem v optických sítích, proto se jim nedostává takové pozornosti, jako zesilovačům typu EDFA.

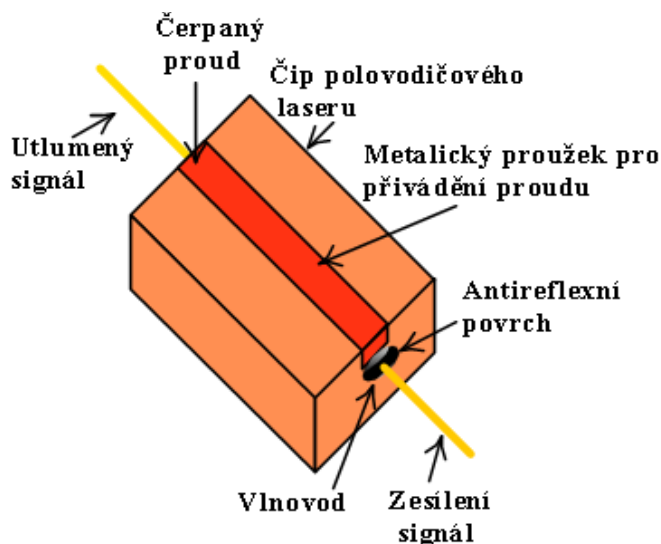
#### 4.2.4 YDFA

Zesilovače s dotací yterbia pracují v okolí vlnových délek 1  $\mu\text{m}$ . Jejich uplatnění je ve velké míře v průmyslu, kde se využívají při zpracovávání materiálů.

### 4.3 Polovodičové optické zesilovače

Impulsem pro úvodní studie na téma polovodičové optické zesilovače bylo vynalezení polovodičového laseru v 60. letech 20. století. První funkční zařízení byla založena na GaAs homopřechodech pracujících při nízkých teplotách. Stejně jako v polovodičových laserech, tak i v SOA měl velký význam nasazení zařízení s dvojitou heterostrukturou. První typy SOA se zaměřovaly na AlGaAs operující v pásmu 830 nm. Až v pozdějších letech se objevily SOA pracující v okolí vlnových délek 1310 a 1550 nm. V dnešní době jde vývoj zesilovačů typu SOA v ruku v ruce s pokroky ve výrobě polovodičových materiálů, konstrukci zařízení, atd.

K vybudování patřičného zisku v optickém vlákně je použito polovodičového prvku. Tento polovodičový prvek svoji strukturou náramně připomíná polovodičový laser. Na aktivní oblast, ve které dochází k zesílení signálu, je přiveden vnější zdroj proudu. Dodává dostatečnou energii pro zesílení. Pro snadné navázání šířící se vlny do aktivní oblasti je využito vlnovodu. Nicméně optické usměrnění není úplné, a proto se část optického signálu objeví v plášti. Na oba plošné konce optického zesilovače je nanесena antireflexní vrstva, aby nedocházelo uvnitř zesilovače k nechtěným odrazům (zásadní rozdíl od laseru). Ve výstupním signálu, tak jako u předchozího typu zesilovače, je obsažená složka šumu tzv. ASE, která vzniká při procesu zesílení.



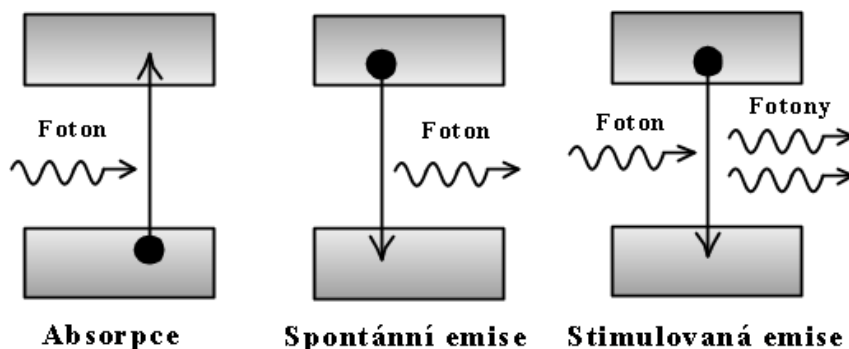
Obr. 4.8: Vnitřní struktura SOA.

Princip činnosti SOA je následující. Elektrony (dále jen nosiče) jsou z vnějšího zdroje proudu vstřikovány do aktivního prostředí, kde zaujmou stavy ve vodivostním pásmu a na jejích místech ve valenčním pásmu vzniknou volné díry. Pokud na aktivní plochu dopadají fotony, pak ve struktuře polovodiče mohou nastat tyto tři jevy: [17]

- Pokud na aktivní plochu dopadá foton o dostatečné energii, může stimulovat nosič z valenčního do vodivostního pásmu. Jedná se o ztrátový jev, kdy je foton tzv. absorbován.
- Pokud na aktivní plochu dopadá foton o odpovídající energii, může způsobit stimulovanou rekombinaci nosiče z vodivostního pásmu a díry z valenčního pásmu. Takto rekombinující nosič uvolní energii ve formě fotonu. Vzniklý foton nabývá stejných parametrů (frekvence, fáze, směr, polarizace) jako foton původní. Oba dva postupující fotony mohou dále stimulovat další přechody za předpokladu, že dodávaný proud je dostatečně velký (dochází k inverzi populace).



- Při posledním jevu dochází k samovolné rekombinaci nosičů, při které je uvolněn foton s náhodnou fází a směrem šíření (tzv. spontánní emise). Takto vzniklé fotony jsou nežádoucí (šum) a snižují počet nosičů dostupných pro tvorbu optického zisku. Spontánní emise je přímým následkem zesilovacího procesu a nelze se jí vyhnout. Z tohoto faktu není možné vyrobit bezšumný SOA. Velikost spontánní emise je nezávislá na intenzitě budícího záření, přesný opak stimulované emise.



Obr. 4.9: Procesy v polovodiči při zesilování.

Matematicky lze zisk po jednom průchodu SOA zesilovače popsat následovně: [18]

$$G = e^{\Gamma \cdot \left[ g_0 \left( \frac{\eta_i \cdot I \cdot \tau_s}{e \cdot L \cdot w \cdot d} - N_0 \right) - \alpha \right] L} \quad [dB], \quad (4.5)$$

kde:  $\Gamma[-]$  je činitel optického usměrnění,  $g_0[-]$  je koeficient zisku,  $\alpha[dBkm^{-1}]$  jsou optické ztráty,  $L[m]$  je délka dutiny,  $w[m]$  je šířka dutiny,  $d[m]$  je tloušťka aktivního prostředí,  $e[C]$  je elektrický náboj,  $\eta_i[\%]$  je účinnost čerpacího proudu,  $I[A]$  je elektrický proud,  $N_0[-]$  je hustota nosičů a  $\tau_s[s]$  je doba spontánní rekombinace.

Mezi limitující parametry polovodičových optických zesilovačů můžeme zařadit šum, polarizaci a nelineární jevy v použitém materiálu.

#### Šum:

Šum v polovodičových zesilovačích by měl mít stejnou hodnotu jako v optických vláknových zesilovačích. Nicméně ve skutečnosti produkují SOA větší šumovou složku, to je způsobeno především ztrátami uvnitř použitého materiálu a při vyvazování a navazování světla na obou koncích zesilovače.

#### Šumové číslo:

Po přečtení předcházejícího odstavce je jasné, že šumové číslo zesilovačů SOA je vyšší než u zesilovačů typu EDFA.

#### Závislost na polarizaci:

Nevýhoda polovodičových zesilovačů je jejich značná závislost na polarizaci vstupního signálu. V optických komunikačních systémech se stav polarizace určuje velmi složitě, jelikož se jejich stav během šíření neustále mění. Díky tomu je velikost zisku zesilovače značně závislá na polarizaci dopadající optické vlny. Vliv tohoto limitujícího parametru se potlačuje návrhem a výrobou zesilovače.

Nelineární jevy:

Nelineární jevy u polovodičových zesilovačů jsou zapříčiněny především změnami v hustotě nosičů způsobeny vstupním signálem. Mezi tři hlavní nelineární jevy řadíme: křížovou fázovou modulaci (XPM), křížovou modulaci (XGM) a čtyřvlnné směšování (FWM). Nicméně se tyto jevy mohou stát užitečnými při rozšíření funkčnosti polovodičových zesilovačů. Mohou plnit funkci převodníku vlnových délek, multiplexoru nebo optického přepínače.

V závislosti na zbytkové odrazivosti obvykle rozdělujeme optické polovodičové zesilovače na dva typy: FPA (Fabry-Perot Amplifiers) a TWA (Travelling Wave Amplifiers). V zesilovači typu FPA se značný podíl světla odráží zpět do aktivní oblasti, i když odrazivost nedosahuje takových hodnot jako u laseru. Spektrum zisku pro tento typ zesilovače není hladký, obsahuje několik vrcholů odpovídající podélné struktuře čipu zesilovače. Na druhou stranu u zesilovače typu TWA je odrazivost velmi nízká a vstupní optický signál je zesílen v jednom průchodu přes strukturu zesilovače. Spektrum zisku u tohoto typu zesilovače je velice hladká funkce. Mezní hodnota odrazivosti pro TWA je  $6 \cdot 10^{-5}$ . Pro dosažení této hodnoty je nutná antireflexní povrchová úprava. [18]

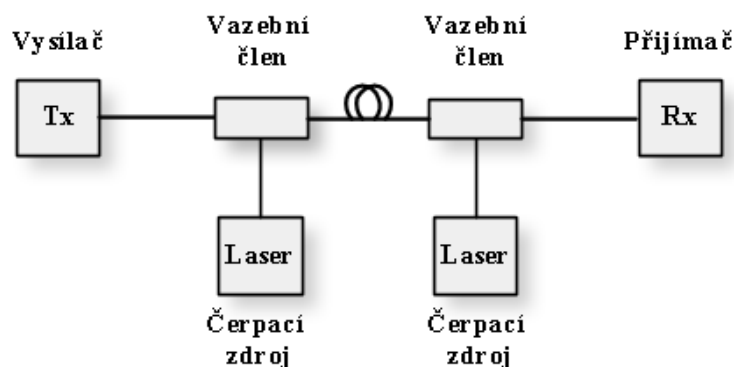
Jednou z variant polovodičového optického zesilovače využívaného v optických sítích je tzv. reflexní optický polovodičový zesilovač (RSOA – Reflective Semiconductor Optical Amplifiers). Jeho vnitřní struktura se do jisté míry podobá optickému rezonátoru vyskytujícího se u polovodičového laseru. Tedy stejně jako u optického rezonátoru je zde použito leštěné zrcadlo, které má za úkol již zesílené světlo prošlé strukturou SOA zpětně odrazit. Tím dosáhneme vyššího zisku v důsledku dvojitého průchodu světla skrz zesilovací oblast.

#### 4.4 Ramanovské zesilovače

Ramanovský zesilovač vychází z principu Ramanova zisku, který vzniká v důsledku tzv. stimulovaného Ramanova rozptylu SRS (Stimulated Raman Scattering). Zmíněný jev byl poprvé publikován v roce 1928 C. V. Ramanem. Podstatou tohoto jevu je vzájemná interakce světla šířícího se v určitém prostředí s tímto prostředím, jejímž důsledkem je frekvenční posuv. Aktivním médiem v tomto zesilovači je optické vlákno nebo v krajních případech i krystal. Vstupní signál je zesilován při průchodu v obou směrech šíření paprsku z čerpacího zdroje.

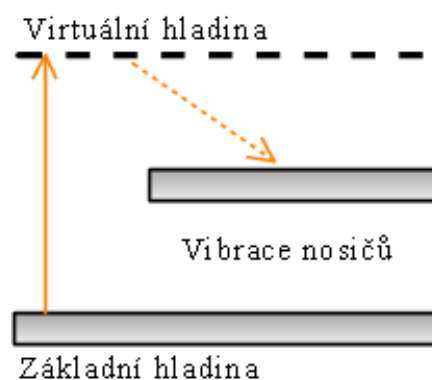
Na rozdíl od zesilovačů typu OFA se v Ramanovském zesilovači nepoužívají vlákna dopovaná vzácnými prvky. V konstrukci zesilovače se používá klasické konvenční vlákno, nebo speciálně vyrobená vlákna s dotací Germania, které dosahují většího zisku. Tato dopovaná vlákna se osvědčila v situacích, kdy potřebujeme dosáhnout velkého zisku na kratším vlákně.

O konstrukci Ramanovského zesilovače se v podstatě dá říct, že je to pouze laserový zdroj záření připojený na optickou trasu. Tento čerpací zdroj však musí nabývat poměrně vysokého výkonu. Pro vlnové délky z oblasti 1500 nm až 1600 nm je zapotřebí použít zdroj 1400 nm. Jako konkrétní typ čerpacího zdroje může být použita buď polovodičová laserová dioda, nebo tzv. Raman Fiber Laser.



Obr. 4.10: Blokové schéma obousměrného zapojení Ramanova zesilovače.

Při Ramanově rozptylu je světlo dopadající na prostředí přeměněno na světlo s nižší frekvencí. Fotony z čerpacího zdroje vybudí nosiče na virtuální hladinu. Ve virtuální hladině setrvávají co nejkratší čas a při sestupu na nižší energetickou hladinu vyzáří signálový foton. Rozdíl energií mezi signálovým a čerpacím fotonem je vyrovnán vibracemi molekul hostitelského materiálu. Křivku Ramanova zisku a frekvenční posuv ovlivňuje velikost těchto vibrací. [19] Pro stimulovaný Ramanův rozptyl platí, že při dostatečném buzení pomocí čerpacího zdroje se rozptyl rychle zvětšuje a většina této energie je přeměněna na rozptyl světla.



Obr. 4.11: Princip zesilování v Ramanovských zesilovačích.

Typická vlastnost Ramanovského zesilovače, která je odlišná od např. EDFA, je schopnost zesilovat signál v celém rozsahu vlnových délek v závislosti na čerpacím zdroji. Pro upravení spektra zisku lze použít i několik čerpacích zdrojů o různých vlnových délkách. Oproti OFA potřebuje Ramanův zesilovač delší vlákno, avšak toto vlákno je ekonomicky levnější (např. konvenční). Mezi jejich výhody řadíme nízkou hodnotu šumu, zatím co do nevýhod spadá značná závislost zisku na polarizaci světla. [19]

Jedním z limitujících parametrů moderních Ramanovských zesilovačů je spontánní Ramanův rozptyl, jenž se velice podobá spontánní emisi u polovodičových zesilovačů. Je součástí zesíleného signálu a vzhledem k náhodné fázi generovaných fotonů se projeví jako šum. Velikost šumu závisí na koncentraci fotonů ve vibrujícím stavu, kterou ovlivňuje teplota zesilovače. Dalším s významných limitujících parametrů je mnohanásobný rozptyl projevující se především u DRA zesilovačů. Většina rozptýleného světla uniká do pláště a posléze ven z vlákna, část se ovšem zpětně odráží a může být vedena jádrem vlákna. Za normálních podmínek by se tento zpětný odraz zanedbal, ale v případě DRA je postupně zesilován.

V závislosti na konfiguraci systému optického zesilovače rozeznáváme dva režimy práce Ramanovských zesilovačů: [20] režim DRA (Distributed Raman Amplifiers) neboli, řešení s rozprostřeným zesilovačem a režim diskretní LRA (Lumped Raman Amplifiers).

#### DRA (Distributed Raman Amplifiers):

V prvním případě se na zesilovacím procesu podílí celá trasa přenosové soustavy, zesilovač je buzen z opačného konce přenosové cesty a pomáhá s vyrovnáním výkonové ztráty signálu v posledním úseku šíření. Nevýhodou tohoto řešení je omezení maximálního počtu přenášených vlnových délek s ohledem na odstup čerpacích kmitočtů zesilovače. Zesilovače pracující v tomto režimu vykazují lepší hodnoty šumu.

#### LRA (Lumped Raman Amplifiers):

Diskretní LRA zesilovač využívá především k zvětšení kapacity optického vlákna tím, že umožňuje zesilovat na vlnových délkách, které jsou pro zesilovače založené na dotaci vzácných prvků nerealizovatelné. Příkladem budiž možnost práce v oblasti pásma S, které takto umožňuje zvětšení přenosové kapacity až 2x oproti zesilovačům založeným na EDFA, pracujícím v pásmu C. Zesilovač LRA je řešen jako diskretní blok, umístěný v jednom místě přenosové cesty, konstruovaný s ohledem na požadovanou šířku pásma a profil zisku daného vedení.

### 4.5 Srovnání zesilovačů

Pro srovnání všech tří skupin zesilovačů uvádím přehlednou tabulku, která obsahuje základní parametry zesilovačů. Pozn. Ze skupiny OFA jsem vybral jednoho zástupce a to zesilovač EDFA.

Vlastnosti	EDFA	SOA	RAMAN
Vlnová délka [nm]	1530 - 1570	1280 - 1650	1270 - 1650
Zisk [dB]	> 40	> 30	> 20
Vložený útlum [dB]	0,1 – 2	6 – 10	0,6 – 1,5
Polarizační citlivost	Ne	Ano	Ano
Čerpací zdroj	optický	elektrický	Optický
Čerpací výkon	25 dBm	< 400 mA	> 27 dBm
Šířka pásma 3dB zisku [nm]	30	30 - 50	Závislost na zdroji
Výstupní saturační výkon [dBm]	10 – 15	5 – 20	0,75 · čerpací zdroj
Šumové číslo [dB]	5	8	5
Cena	střední	nízká	vysoká

Tab. 4.1: Srovnání základních parametrů tří skupin zesilovačů.

## 5 Měření základních parametrů v přístupových sítích

V této kapitole práce jsou popsány základní kvalitativní parametry, které se v optických přístupových sítích zkoumají, a to Q – faktor, bitová chybovost a diagram oka. Také je zde popsán i jejich matematický popis. Závěr kapitoly se věnuje popisu optického spektrálního analyzátoru (OSA), jenž je při praktické části diplomové práce hojně využíván.

### 5.1 Měření BER

#### 5.1.1 Q – faktor

Q – faktor (Quality faktor) vyjadřuje kvalitu analogového signálu s ohledem na jeho odstup signál šum. Tento parametr zahrnuje všechna fyzikální zhoršení, jako jsou veškeré šумы, disperze a nelineární jevy, které degradují kvalitu signálu a způsobují bitovou chybovost (BER). Z toho vyplývá, že čím je hodnota Q – faktoru vyšší, tím je nižší bitová chybovost (vyšší odstup signál šum). Matematicky lze Q – faktor popsat rovnicí: [22]

$$Q = \frac{I_1 - I_0}{\sigma_1 - \sigma_0} \quad [-], \quad (5.1)$$

kde  $I_1$  je logická úroveň v „1“,  $I_0$  je logická úroveň v „0“,  $\sigma_1$  je standardní odchylka logické úrovně „1“ a  $\sigma_0$  je standardní odchylka logické úrovně „0“.

#### 5.1.2 Bitová chybovost

Bitová chybovost (BER) je definovaná jako poměr chybně přijatých bitů bE ku celkovému počtu přijatých bitů p za přesně stanovenou dobu. Je ovlivňována stejnými faktory jako Q – faktor. Matematicky lze bitová chybovost popsat vzorcem: [22]

$$BER = \frac{bE}{v_p \cdot t} \quad [-], \quad (5.2)$$

kde  $v_p$  je přenosová rychlost a  $t$  je doba, po kterou probíhá měření.

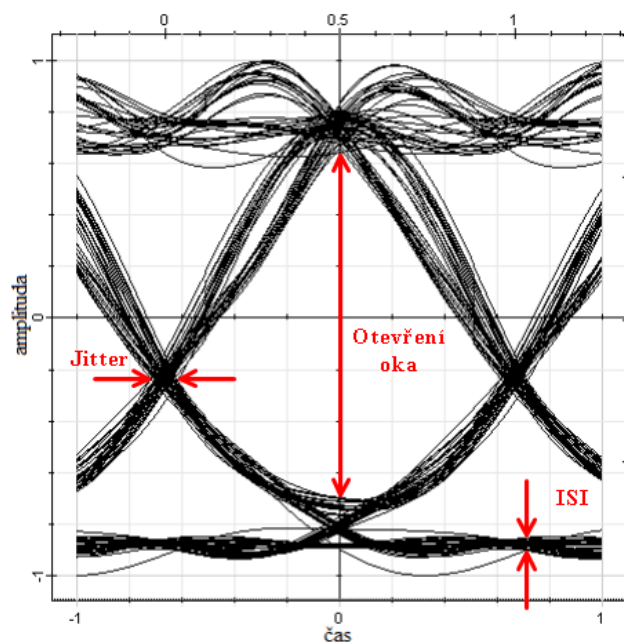
V reálných digitálních komunikačních systémech je rozhodující v jakém časovém úseku vzorkovat a zda vzorkovaná hodnota reprezentuje logickou úroveň „1“ nebo „0“, což vede k tomu, že je tu nenulová pravděpodobnost chybového rozhodnutí. Proto kvalita přijatého signálu souvisí s bitovou chybovostí, která je hlavním indikátorem kvality celkového systému. [22] Ze znalosti parametru Q – faktor můžeme vypočítat i bitovou chybovost dle vztahu: [22]

$$BER = \frac{1}{2} \cdot \operatorname{erfc}\left(\frac{Q}{\sqrt{2}}\right) \approx \frac{\exp\left(\frac{-Q^2}{2}\right)}{Q \cdot \sqrt{2\pi}} \quad [-] \quad (5.3)$$

Mezi další ovlivňující parametry bitové chybovosti hlavně pak v sítích s vlnovým multiplexem a implementovaným zesilovačem patří, ASE u zesilovačů, rozdílné zesílení v jednotlivých kanálech, rozladění kanálů, časové zpoždění (tzv. jitter), chromatická a polarizační módová disperze, přeslechy mezi kanály a rozptyly na nehomogenitách.

### 5.1.3 Diagram oka

Diagram oka představuje superpozici všech navzájem překrytých bitů v signálu. [22] Ukázka diagramu oka pro NRZ signál je na obr. 5.1. Na diagramu oka jsou vidět dva typy nežádoucích efektů. První je efekt mezisymbolových interferencí (ISI) a druhý je efekt kolísání zpoždění (jitter). ISI je způsobeno překrýváním jednotlivých modulačních impulsů. Kolísání zpoždění je definováno jako krátkodobá odchylka digitálního signálu z jeho ideální pozice. [22] Vetší otevření oka značí vyšší kvalitu signálu (menší útlum nebo rušení).



Obr. 5.1: Diagram oka pro NRZ signálu.

## 5.2 Optický spektrální analyzátor (OSA)

Optický spektrální analyzátor je přístroj, který dokáže vykreslit na svém displeji optické spektrum nacházející se na fyzické vrstvě sítě. Jeden ze základních principů činnosti spočívá v rozkladu optického záření na difrakční mřížce a následné analyzování rozloženého spektra vhodným fotodetektorem (vnitřní blokové schéma je znázorněné na Obr. 5.2). Používané uspořádání měřicí sestavy uvnitř OSA jsou následující: [5]

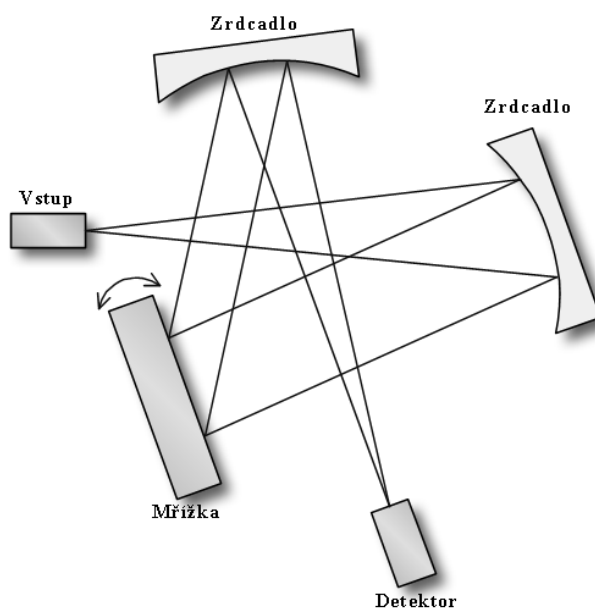
- Pevná mřížka, pevný fotodetektor – detektor pro vyhodnocování spektra je tvořen skupinou fotodiód.
- Rotační mřížka, pevný fotodetektor – jedná se o nejběžnější uspořádání v laboratorních přístrojích, kdy spektrální rozsah dosahuje hodnot až 600 – 1700 nm (široký rozsah). Nevýhoda této varianty je náchylnost na mechanické otřesy.
- Pevná mřížka, rotační fotodetektor – jedná se o méně náchylnou variantu na mechanické otřesy, která dosahuje menšího spektrálního rozsahu.

Výhodou OSA je jeho vysoká citlivost měření optického výkonu, dokáže měřit v rozsahu -80 dBm až 20 dBm. Nevýhodou přístroje je však omezená selektivita a snížená přesnost měření vlnových délek na cca +/- 50 pm, což je způsobeno složitostí opto-mechanické soustavy. [5] OSA si lze také pro jednoduchost představit jako laditelný optický filtr, který je umístěn před

fotodetektořem. Hlavní parametry OSA souvisí právě s kvalitou použitého filtru. Mezi tyto parametry patří zejména [5]:

**Rozlišovací šířka pásma (RBW – Resolution Bandwidth).** Tento parametr v podstatě udává šířku pásma filtru (laditelné pásmové propusti) a měří se z poklesu výkonové úrovně o 3 dB. Někdy se značí jako šířka štěrby OSA.

**Poměr optického potlačení (ORR – Optical Rejection Ratio).** Tento parametr si lze představit jako strmost spektrální filtrace. Jelikož filtry nejsou ideální, zobrazí se namísto jediné frekvence (úzké spektrální čáry) spektrální čára roztažená do stran. Do jaké míry je čára roztažená, udává právě zmíněný parametr.



Obr. 5.2: Vnitřní blokové schéma OSA.

## 6 Simulace

Tato kapitola diplomové práce se věnuje návrhu a simulaci aktivních optických sítí v softwarovém prostředí produktu Optiwave Optisystem 10.0. Zmíněný sofistikovaný software simuluje navržené síť na hladině fyzické vrstvy OSI modelu.

První simulace se zaměřuje na další generace optických přístupových sítí, kde je navržena síť L-R PON. V druhé simulaci se pak zkoumá možné nasazení optických zesilovačů do přístupové sítě typu WDM-PON. Jmenovitě se jedná o zesilovače optického vláknového typu (zástupce EDFA), polovodičový zesilovač (SOA) a optický zesilovač Ramanovského typu. Úkolem těchto simulací je provedení rozboru zkoumaných přenosových vlastností a kvality sítě. Výsledky týkající se aplikování zesilovače typu EDFA do WDM-PON jsou posléze porovnány s reálnými hodnotami na funkční síti.

### 6.1 L – R PON

L-R PON aktivní optická síť byla v prostředí Optisystem sestavena tak, aby se co nejvíce přiblížila topologii popsané v kapitole 3.4.2, kde jsou popsány i významy jednotlivých prvků. Navrhovaný model je tedy projektován na vzdálenost 100 km s garantovanou přenosovou rychlostí 10 Gbit/s při plně duplexním provozu. Upraven byl pouze počet koncových uživatelů, a to na hodnotu 190 připojených jednotek.

#### 6.1.1 Popis topologie L – R PON

Navrženou topologie lze rozdělit na tři základní části centrální jednotku u poskytovatele připojení, optickou distribuční část (ODN) a koncovou jednotku umístěnou na straně zákazníka (ONU). Pevnou součástí topologie jsou i měřicí přístroje a analyzátory. Kompletní návrh zapojení je vyobrazen v příloze A.

#### CENTRÁLNÍ JEDNOTKA

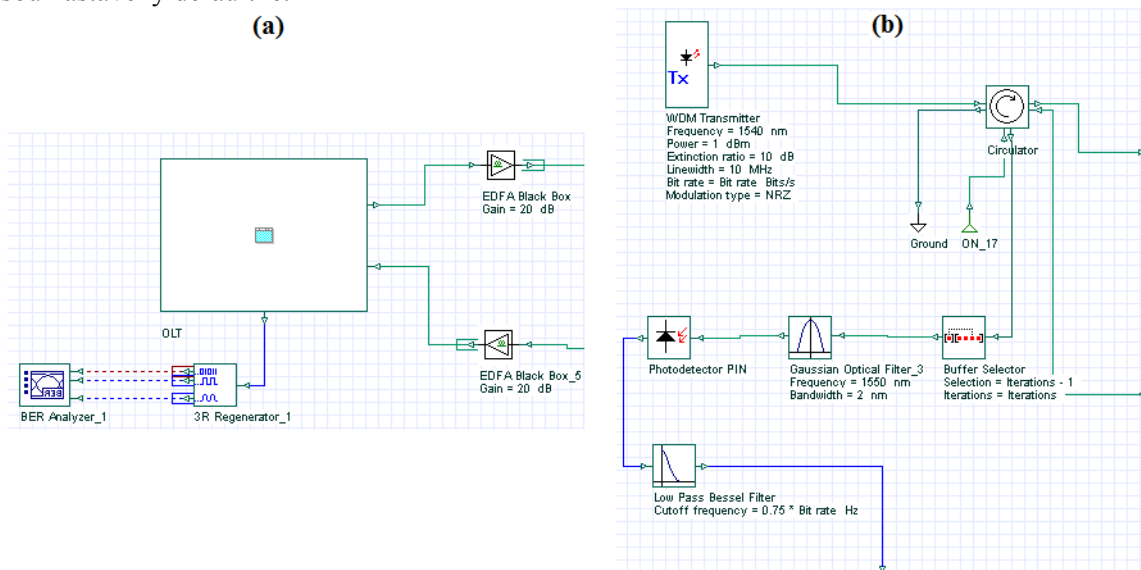
Tato ústředna se dále dělí na dílčí bloky, kterými jsou linkové koncové zakončení OLT a sada optických zesilovačů. Pro zajištění duplexního provozu se musí v obou koncových jednotkách OLT/ONU nacházet zároveň optický vysílač i přijímač. Parametry nastavené na vysílači v OLT jednotce jsou následující:

- **Vlnová délka 1540 nm.** Zmíněná vlnová délka byla zvolena s ohledem na použité zesilovací prvky. Jelikož je zvolen optický vláknový zesilovač EDFA, který nejlepších zesilovacích vlastností dosahuje v pásmu C, musí se zajistit, aby pracovní vlnová délka vysílače také odpovídala zmíněnému pásmu (tedy 1540 nm).
- **Vysílací výkon 1 dBm.** Zvolený vysílací optický výkon je převzatou hodnotou, která se reálně vyskytuje ve standardu GPON (typu MiniMAP 9102 + Modul GePON – EPON2 (TN-118-B)).
- **Modulace NRZ.** Jedná se o nejběžnější modulaci využívanou v optických sítích.
- **Přenosová rychlost 10 Gbit/s.**



Přijímací část OLT jednotky tvoří Buffer Selector, který slouží pro účely simulace. Pro správnou funkci tohoto prvku musí být nastaven parametr Selection = Iterations - 1. Dále pak 2 nm optickým filtrem (Gaussian Optical Filter), jehož úkolem je propustit pouze specifikovanou vlnovou délku (1550 nm jedná se o vysílací vlnovou délku ONU) a ostatní potlačit. Následuje PIN fotodioda s citlivostí 1 A/W a dolní propust k odfiltrování vysokofrekvenčního šumu. Pro zabezpečení obousměrného provozu je použit cirkulátor s vložitelným útlumem 1 dB.

V centrální jednotce se také nachází, BER analyzátor s 3R regenerátorem, jejímž úkolem je vyhodnocovat přijímaný signál. Další dílčí částí centrální jednotky jsou optické zesilovače umístěné v každém směru. Jelikož zesilovače typu EDFA patří k nejrozšířenějším zesilovačům vůbec, byl tento typ zvolen i v navrhované topologii. Zesilovač obsahuje jednoduché nastavení, kdy se nastaví pouze zisk 20 dB (vychází z reálného zesilovače CLA PB01F), ostatní parametry jsou nastaveny defaultně.

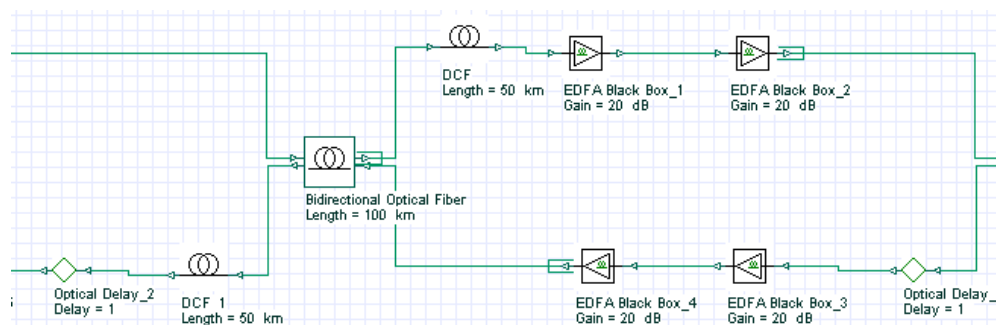


Obr. 6.1: (a) Centrální jednotka v L-R PON. (b) Jednotka OLT v L-R PON.

## ODN

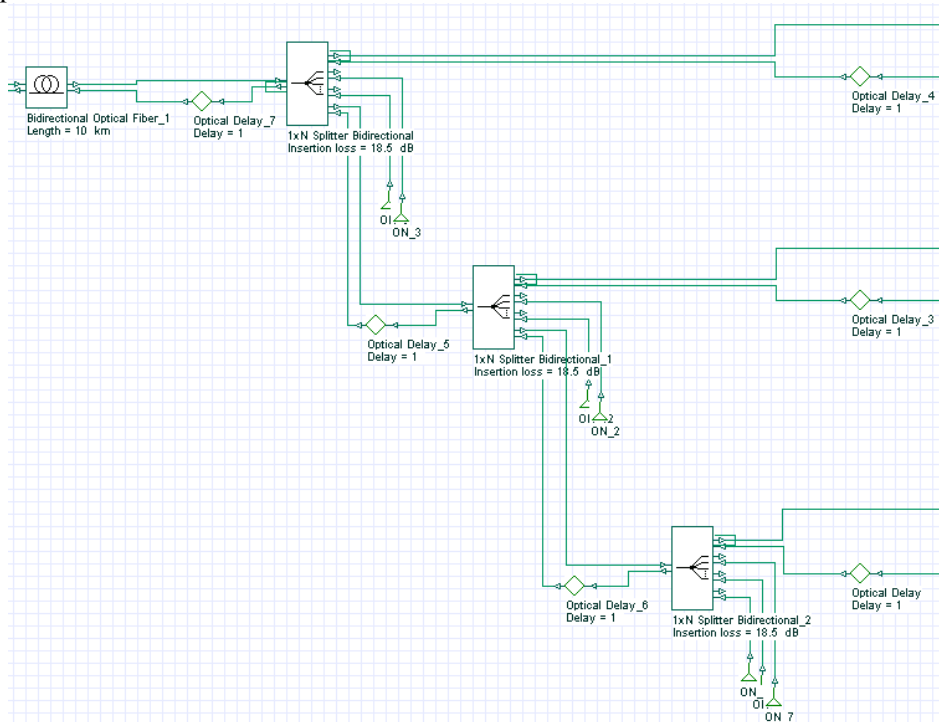
Optická distribuční část navrhovaného modelu se skládá z páteřní části, místní ústředny a distribuční části. Hlavní komponentou páteřní části je jednovlákenné optické vlákno délky 100 km s parametry odpovídajícími vláknu G.652.C/D, tj. vložitelný útlum 0,24 dB/km, koeficient chromatické disperze 16,75 ps/nm/km. Kvůli velké vzdálenosti páteřního vlákna a velké přenosové rychlosti bylo zapotřebí do navrhované topologie zaimplementovat kompenzaci chromatické disperze. K tomuto účelu slouží v páteřní části DCF vlákna dlouhá 50 km s nastavenými hodnotami vložitelného útlumu 3,5 dB, koeficientem chromatické disperze -16,63 ps/nm/km. Prvky pod označením optical delay slouží pro účel simulace, aby bylo možné simulovat oba směry provozu zároveň.

V místní ústředně se nachází hlavní zesilovací aparát v podobě dvou kaskádně řazených EDFA zesilovačů, které mají stejné nastavení jako zesilovače v centrální jednotce, tedy zisk 20 dB. Opět je zde ve zpětném směru prvek optical delay, sloužící pro účel simulace.



Obr. 6.2: Páteřní část a místní ústředna v L-R PON.

Posledním blokem ODN je distribuční část, kde se nachází pasivní dělicí prvky a jednovidové optické vlákno. Jednovidové optické vlákno délky 10 km reprezentuje maximální vzdálenost připojení ONU jednotek k místní ústředně. Parametry optického vlákna se shodují s parametry nastavenými v páteřním vlákně. Hlavní pasivní dělicí blok tvoří kaskádní řazení tří pasivních děličů. Vložený útlum každého dělicího prvku má hodnotu  $18,5\text{ dB}$ , což odpovídá reálné hodnotě děliče 1:64. Jelikož jsou za sebou zapojeny tři takové prvky, maximální počet připojených koncových uživatelů činí 190. Opět se v tomto bloku nachází prvky optical delay sloužící pro účel simulace.



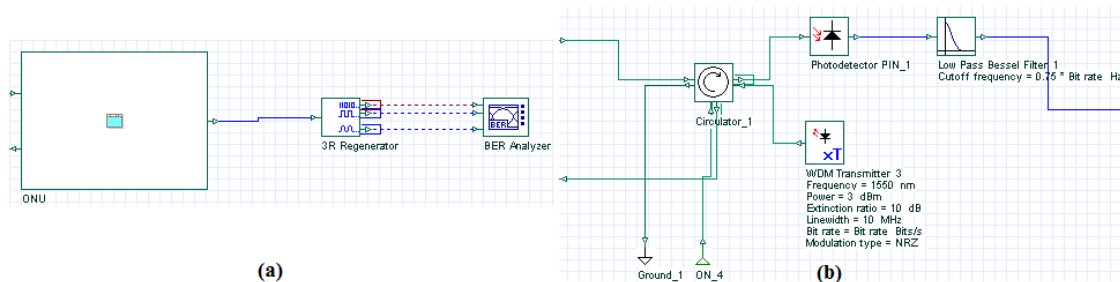
Obr. 6.3: Distribuční část v L-R PON.

## ONU

ONU jednotku opět tvoří vysílací a přijímací části. Vysílací část se skládá z WDM vysílače, který má nastaveny parametry na hodnoty:

- **Vlnová délka 1550 nm.** Zvolena se stejnou úvahou jako u vysílače OLT.

- **Výkon 3 dBm.** Opět vychází z reálné hodnoty ve standardu GPON.
- **Modulace NRZ.**
- **Přenosová rychlost 10 Gbit/s**



Obr. 6.4: (a) Jednotka ONU v L-R PON. (b) Vnitřní zapojení ONU v L-R PON.

Přijímací část ONU tvoří PIN fotodioda s citlivostí  $1 \text{ A/W}$  a dolní propust k odfiltrování vysokofrekvenčního šumu. Pro zabezpečení obousměrného provozu je stejně jako v OLT použit cirkulátor s vložitelným útlumem  $1 \text{ dB}$ . Vyhodnocení přijímaného signálu zajišťuje 3R regenerátor s BER analyzátorem.

Aby celá simulace fungovala, je nutné nastavit počet opakování simulace. V Layout Parameter, záložce Signals nastavit hodnotu Iterations = 7 (odpovídá počtu prvku optical delay v trase signálu + 1).

### 6.1.2 Výsledky simulace

#### VÝKONOVÁ BILANCE

V odstavci výkonová bilance jsou vyneseny výkonové úrovně optického signálu (změřeny pomocí Power Meteru) v různých bodech navrhované topologie. Přesné umístění měřících přístrojů je uvedeno v příloze A. Tab. č. 6.1 udává získané výsledky pro směr downstream (OLT -> ONU). V této tabulce je zaznamenána i útlumová bilance mezi jednotlivými úseky topologie, kdy znaménko „+“ značí zesílení signálu, naopak znaménko „-“ značí ztrátu signálu.

Místo měření	Úroveň signálu [dBm]	Útlumová bilance [dBm]
Výstup z OLT (PwM)	-2,652	+ 19,302
Výstup z jádrové ústředny (PwM_1)	16,650	
Vstup do místní ústředny (PwM_2)	-10,850	- 27,500
Výstup z místní ústředny (PwM_3)	30,667	+ 41,517
Vstup ONU č. 1 (PwM_4)	19,246	- 11,421
Vstup ONU č. 64 (PwM_5)	10,226	- 20,441
Vstup ONU č. 127 (PwM_6)	1,205	- 29,462

Tab. 6.1: Naměřené hodnoty výkonu pro směr downstream.

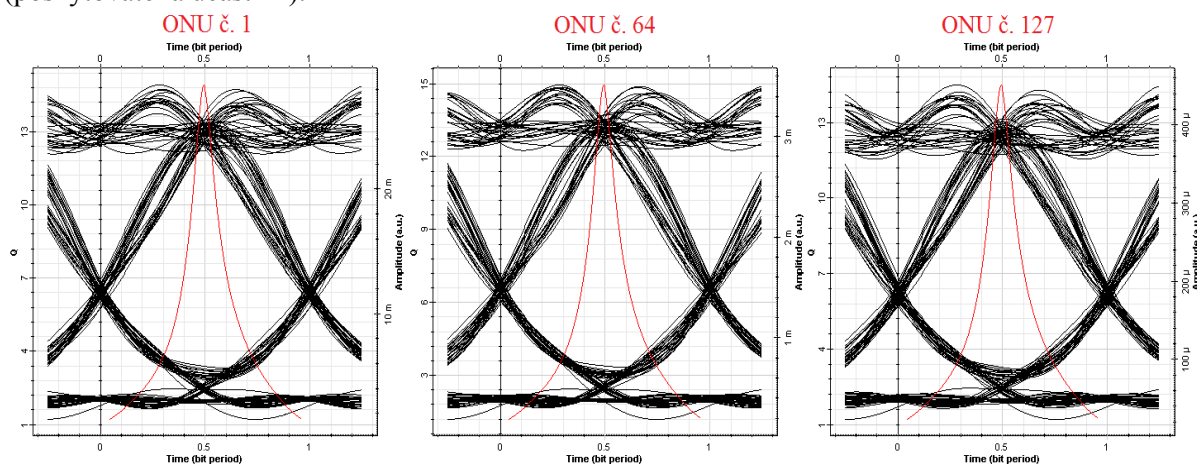
Stejně tak lze analyzovat výsledky výkonových úrovní optického signálu a útlumové bilance pro směr upstream (ONU -> OLT) uvedené v Tab. č. 6.2.

Místo měření	Úroveň signálu [dBm]	Útlumová bilance [dBm]
Výstup ONU (PwM_13)	- 0,652	- 9,020
Výstup první dělič (PwM_11)	- 9,672	
Výstup druhý dělič (PwM_10)	- 7,590	- 7,756
Vstup do místní ústředny (PwM_7)	- 8,882	- 9,019
Výstup z místní ústředny (PwM_8)	29,720	+ 38,607
Vstup do jádrové ústředny (PwM_12)	2,220	- 27,500
Vstup do OLT (PwM_9)	17,992	+ 15,777

Tab. 6.2: Naměřené hodnoty výkonu pro směr upstream.

### DIAGRAM OKA, Q – FAKTOR A CHYBOVOST BER

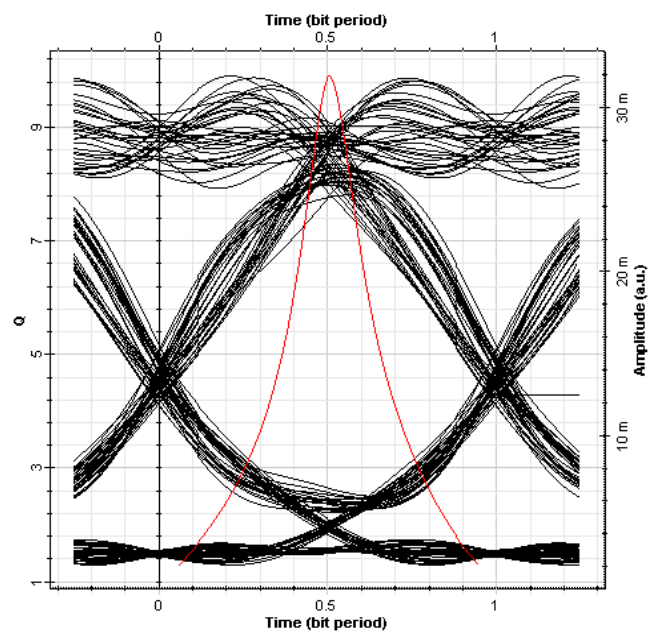
Význam a vzájemné propojení těchto parametrů již byl blíže popsán v kapitole č. 5. Přístroj, který v simulačním prostředí měří všechny tři uvedené parametry, se nazývá BER analyzátor. V navrhovaném modelu bylo provedeno měření na obou koncích přístupové sítě (poskytovatel a účastník).



Obr. 6.5: Diagramy oka na straně ONU jednotek.

Na přijímači v ONU jednotce č. 1 byla naměřena hodnota bitové chybovosti  $BER = 1,617 \cdot 10^{-50}$  a hodnota Q-faktoru  $Q = 14,90$ . V ONU jednotce č. 64 byly zjištěny hodnoty  $BER = 8,078 \cdot 10^{-51}$ ,  $Q = 14,95$  a v ONU jednotce č. 127  $BER = 6,913 \cdot 10^{-48}$ ,  $Q = 14,49$  (viz Obr. 6.5).

Na přijímači v OLT byla naměřena hodnota bitové chybovosti  $BER = 1,947 \cdot 10^{-23}$  a hodnota Q-faktoru  $Q = 9,91$  (viz Obr. 6.6)..

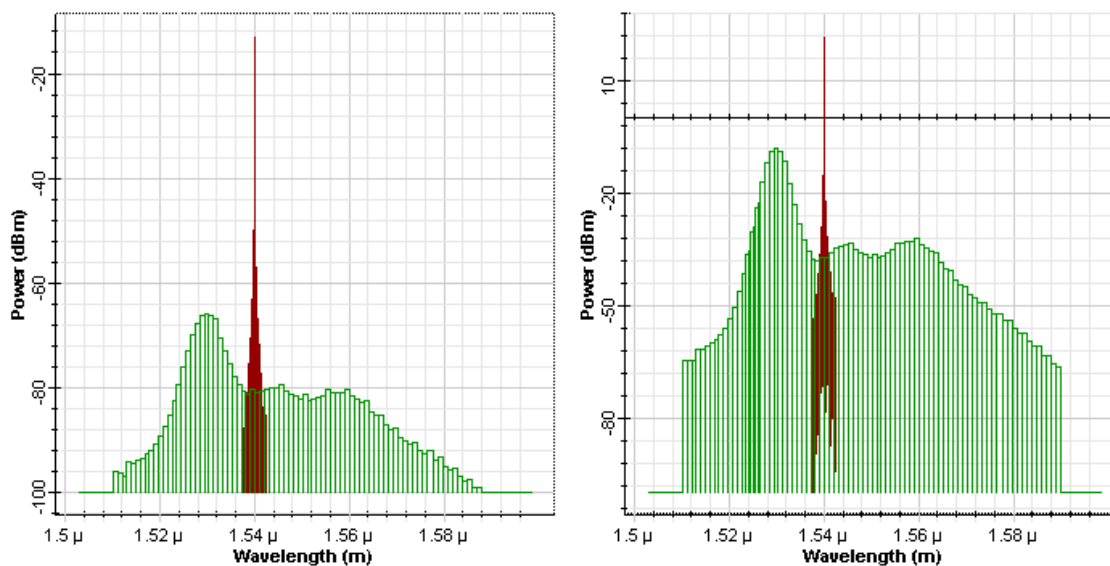


Obr. 6.6: Diagramy oka na straně OLT jednotek.

### OPTICKÉ SPEKTRUM

Optické spektrum má v sítích, kde jsou použity pouze dvě vlnové délky na oddělení provozu v optickém vlákne menší význam. Lepší uplatnění nachází v sítích xWDM.

V navrhované topologii má informativní charakter, především pro zobrazení optického spektra dvou kaskádně zapojených zesilovačů. Získané spektra z OSA je možné vidět na Obr. 6.7, zde si můžeme všimnout markantního nárůstu šumové složky (zelená křivka).



Obr. 6.7: Náměr OSA na vstupu a výstupu místní ústředny.

## 6.2 WDM-PON s aplikovaným zesilovačem

Aby bylo možné získané výsledky porovnat s naměřenými hodnotami, je nutné sestavit v simulačním programu Optiwave topologii, která se svými parametry co nejvíce podobá reálným síťovým prostředkům dostupným na katedře Telekomunikační techniky VŠB-TU Ostrava. Byla tedy navržena WDM-PON topologie pro 6 koncových jednotek a 3 různé symetrické přenosové rychlosti (125 Mbit/s; 1,25 Gbit/s; 2,5 Gbit/s). Vzdálenost optické sítě je pro různé rychlosti odlišná. Závisí na výkonnosti systému, jmenovitě na parametru bitové chybovosti, kdy správná funkce sítě je garantovaná pro maximální hodnotu  $BER = 10^{-12}$ . S ohledem na uvedenou hodnotu bitové chybovosti se tedy nastavila maximální vzdálenost pro jednotlivé přenosové rychlosti. Do takto navrhnutého modelu WDM-PON sítě byl poté aplikován zesilovací prvek. Poloha zesilovacího prvku v obou směrech odpovídá třem základním umístěním vycházející z praxe, a to na začátku optické trasy (výkonový zesilovač), v průběhu optické trasy (průběžný zesilovač) nebo na konci optické trasy (předzesilovač).

### 6.2.1 Popis topologie WDM-PON

Stejně jako předchozí navrženou topologie lze i WDM-PON model rozdělit do tří obdobných částí optické linkové zakončení (OLT), optická distribuční část (ODN) a optická koncová jednotka (ONU). Pevnou součástí topologie jsou i měřicí přístroje a analyzátoři. Kompletní návrh zapojení je vyobrazen v příloze A.

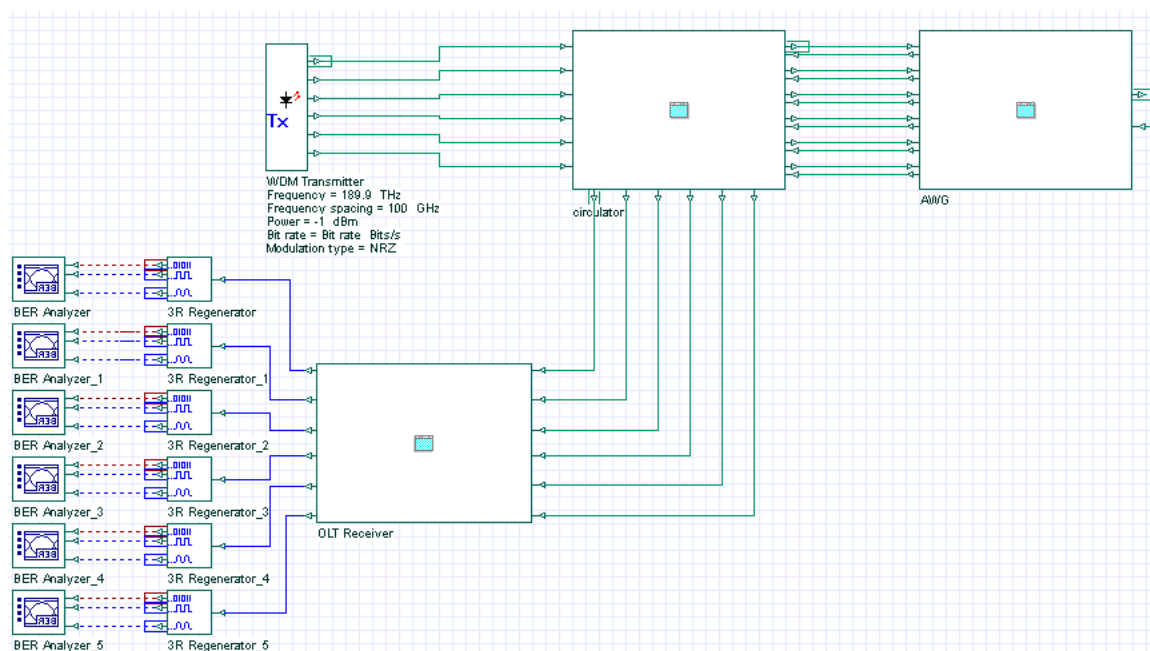
#### OPTICKÉ LINKOVÉ ZAKONČENÍ (OLT)

Základní parametry nastavené v tomto bloku vychází z reálných hodnot OLT jednotky LG-Ericsson EA 1100. Pro zajištění duplexního provozu byl zvolen obdobný princip jako v předchozí simulaci, tedy současné použití optického vysílače a optického přijímače. Parametry nastavené na vysílači jsou následující:

- **Pilotní frekvence kanálů 189,9 THz.** Zvolená frekvence odpovídají šestému kanálu, na kterém vysílá reálná OLT jednotka. Zbývající kanály vysílaly na nosných frekvencích 190,0 THz; 190,1 THz; 190,2 THz; 190,3 THz; 190,4 THz.
- **Frekvenční rastr 100 GHz.** Jedná se o rozestup mezi jednotlivými kanály.
- **Vysílací výkon -1 dBm.** Zvolený vysílaný optický výkon odpovídá výkonu v jednom kanále. Opět má reálný základ z OLT jednotky LG-Ericsson EA 1100.
- **Modulace NRZ.** Jedná se o nejběžnější modulaci využívanou v optických sítích.
- **Přenosová rychlost 125 Mbit/s; 1,25 Gbit/s; 2,5 Gbit/s.** Zjištěné výsledky simulace odpovídají třem různým přenosovým rychlostem.

Přijímací část OLT jednotky tvoří Buffer Selector, který slouží pro účely simulace. Pro správnou funkci tohoto prvku musí být nastaven parametr Selection = Iterations – 1. Následuje PIN fotodioda s citlivostí  $1 A/W$  a dolní propust k odfiltrování vysokofrekvenčního šumu. Vyhodnocení přijímaného signálu zajišťuje 3R regenerátor s BER analyzátořem. Pro zajištění obousměrného provozu je použit cirkulátor s vložitelným útlumem 1 dB.

Další důležitou část OLT jednotky tvoří AWG splitter, který slouží pro de/multiplexování optického signálu. Jeho pilotní frekvence byla nastavena na 189,9 THz s kmitočtovým rastrem 100 GHz. Vložitelný útlum tohoto prvku opět vychází z reálné OLT jednotky a má hodnotu 5 dB.

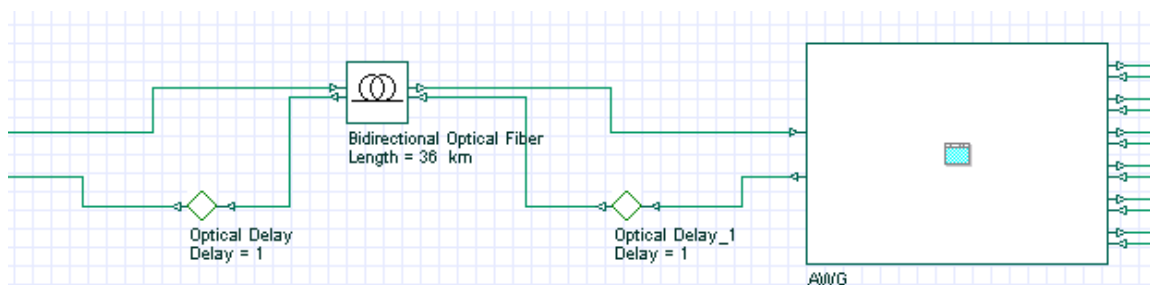


Obr. 6.8: OLT jednotka navrženého WDM-PON modelu.

Jelikož síťové zařízení LG-Ericsson EA 1100 pro oddělení up/downstreamu používá frekvenční pásmo C a L, bylo nutné tuto skutečnost zaimplementovat i do navrhovaného modelu. Pro multiplexování tak velkého frekvenčního rozsahu bylo nezbytné v systému Optiwave použít 57 pinového AWG splitteru, na kterém je nutné pro zajištění správné funkce ošetřit nezapojené vstupní piny připojením na optickou nulu (obrázek navrhnuté komponenty viz. příloha A.).

### OPTICKÁ DISTRIBUČNÍ ČÁST (ODN)

Hlavní komponentou ODN je jednovidové optické vlákno s parametry odpovídajícími vláknu G.652.C/D, tj. vložný útlum  $0,24 \text{ dB/km}$ , koeficient chromatické disperze  $16,75 \text{ ps/nm/km}$ . Další komponenta nacházející se v ODN je AWG splitter, jehož parametry jsou totožné s již popsáním AWG splitterem. Prvky pod označením optical delay slouží pro účel simulace, aby bylo možné simulovat oba směry provozu zároveň.

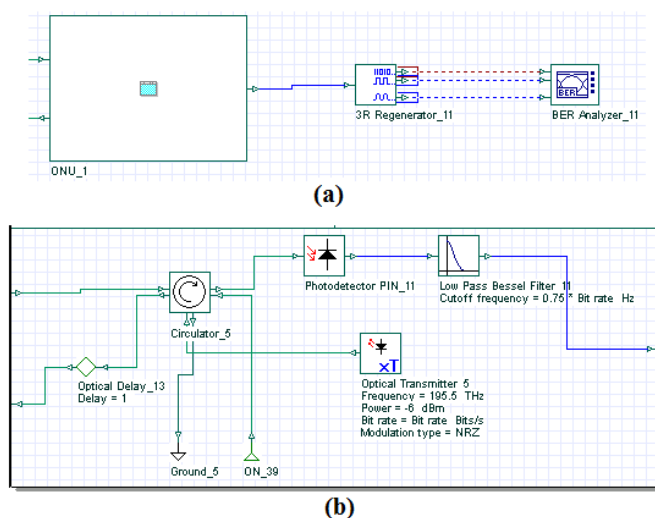


Obr. 6.9: ODN navrženého WDM-PON modelu.

## OPTICKÉ KONCOVÉ ZAŘÍZENÍ (ONU)

ONU jednotku opět tvoří vysílací a přijímací částí. Vysílací část se skládá z WDM vysílače, který má nastaveny parametry na hodnoty:

- **Pilotní frekvence kanálů 195,5 THz.** Zvolená frekvence odpovídají prvnímu kanálu, na kterém přijímá reálná OLT jednotka. V dalších ONU je pak frekvence nastavena na 195,4 THz; 195,3 THz; 195,2 THz; 195,1 THz; 195,0 THz.
- **Výkon -6 dBm.** Hodnota vysílaného výkonu vychází z reálné hodnoty na ONU jednotce LG-Ericsson EARU 1112.
- **Modulace NRZ.**
- **Přenosová rychlost 125 Mbit/s; 1,25 Gbit/s; 2,5 Gbit/s.** Výsledky simulace odpovídají třem různým přenosovým rychlostem.



Obr. 6.10: (a) Jednotka ONU v WDM-PON. (b) Vnitřní zapojení ONU v WDM-PON.

Přijímací část ONU tvoří PIN fotodioda s citlivostí  $1 A/W$  a dolní propust k odfiltrování vysokofrekvenčního šumu. Pro zabezpečení obousměrného provozu je stejně jako v OLT použit cirkulátor s vloženým útlumem  $1dB$ . Vyhodnocení přijímaného signálu zajišťuje 3R regenerátor s BER analyzátozem.

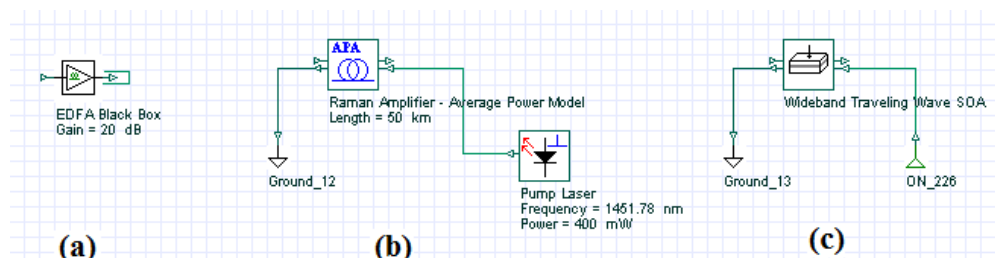
Aby celá simulace fungovala, je nutné nastavit počet opakování simulace. V Layout Parameter, záložce Signals nastavit hodnotu Iterations = 5 (odpovídá počtu prvku optical delay v trase signálu + 1).

## ZESILOVACÍ PRVKY

Do navržené topologie byly postupně aplikovány tři různé druhy zesilovacích prvků, a to EDFA zesilovač, Ramanův zesilovač, polovodičový optický zesilovač. Zesilovač EDFA v simulačním prostředí Optiwave reprezentuje prvek EDFA Black box s nastavenými parametry:

- **Zisk 20 dB.** Jedná se o hodnotu, která má reálný základ v optickém vláknovém zesilovači CLA PB01F.
- Ostatní parametry odpovídají defaultním hodnotám.





Obr. 6.11: (a) Reprezentant EDFA zesilovače. (b) Reprezentant ramanova zesilovače. (c) Reprezentant SOA.

Ramanův zesilovač je v simulačním prostředí reprezentován prvkem Raman Amplifier – Average Power Model a čerpacím zdrojem. Nastavené hodnoty na těchto prvcích jsou následující:

- Délka vlákna 50 km.
- Útlum vlákna 0,2 dB/km.
- „Raman gain peak“  $9,5 \cdot 10^{-14}$ .
- Ostatní parametry odpovídají defaultním hodnotám.

Čerpací zdroj pak pracuje na vlnové délce 1451,78 nm s výkonem 400 mW.

Poslední zesilovač využitý v simulačním prostředí Optiwave je SOA, který reprezentuje součástka Wideband Traveling Wave SOA s nastavenou hodnotou injekčního proudu 0,13 A.

## 6.2.2 Výsledky simulace

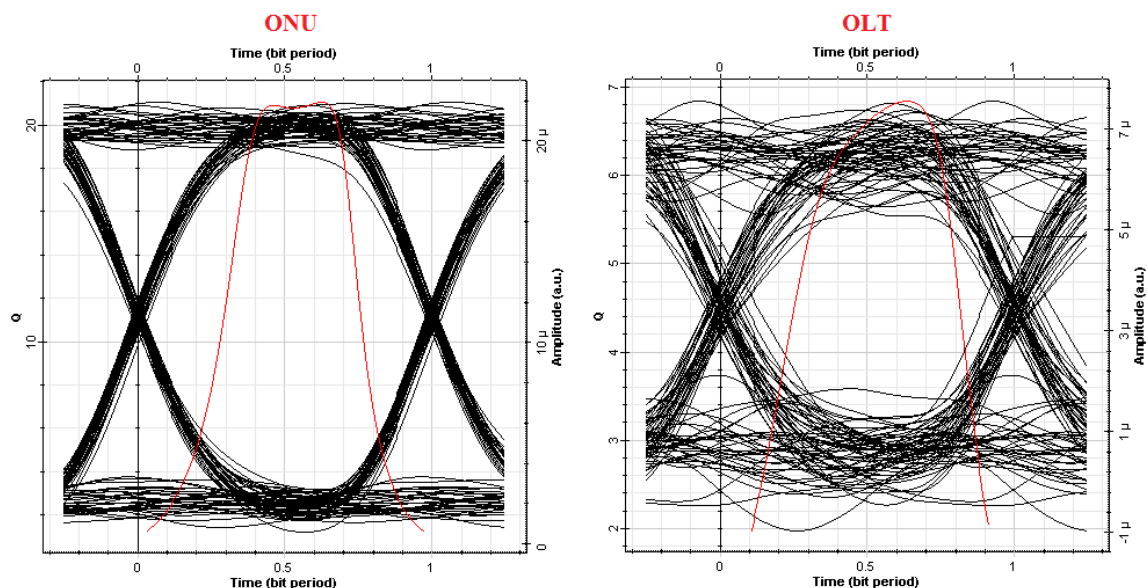
V této podkapitole se nacházejí naměřené výsledky pro přenosovou rychlost 1,25 Gbit/s a pro tři různá umístění zesilovacího prvku. První umístění je umístění na začátku optické trasy, což odpovídá výkonovému zesilovači ve směru downstream a předzesilovači ve směru upstream. Druhé umístění se nachází někde v optické trase, kdy zesilovací prvek má v obou směrech funkci průběžného zesilovače. Poslední umístění odpovídá předzesilovači ve směru downstream a výkonovému zesilovači ve směru upstream. Výsledky pro ostatní přenosové rychlosti jsou pak uvedeny v příloze B.

Požadovaná bitová chybovost  $BER = 10^{-12}$  v jednom ze směrů navrhnuté WDM-PON topologie byla pro přenosovou rychlost 1,25 Gbit/s a bez aplikovaného zesilovacího prvku dosažena při vzdálenosti optické trasy 16 km. Zjištěné hodnoty Q – faktoru a BER pro pospanou situaci jsou zaznamenány v Tab. č. 6.3.

Parametr	Downstream	Upstream
Q-faktor [-]	21,052	6,845
BER [-]	$1,08 \cdot 10^{-98}$	$3,81 \cdot 10^{-12}$

Tab. 6.3: Naměřené hodnoty kvalitativních parametrů pro maximální dosah.

Těmto hodnotám kvalitativních parametrů odpovídají diagramy oka znázorněné na Obr. č. 6.12.



Obr. 6.12: Diagramy oka na obou koncích přístupové sítě.

### 6.2.2.1 První umístění zesilovače

#### EDFA

Jak již bylo zmíněno v úvodu podkapitoly, první umístění zesilovacího prvku odpovídá výkonovému zesilovači ve směru downstream s nastaveným ziskem 10 dB a předzesilovači ve směru upstream s nastavenou hodnotou zisku 20 dB. Hodnoty zisku odpovídají hodnotám nastaveným při měření na reálné síti.

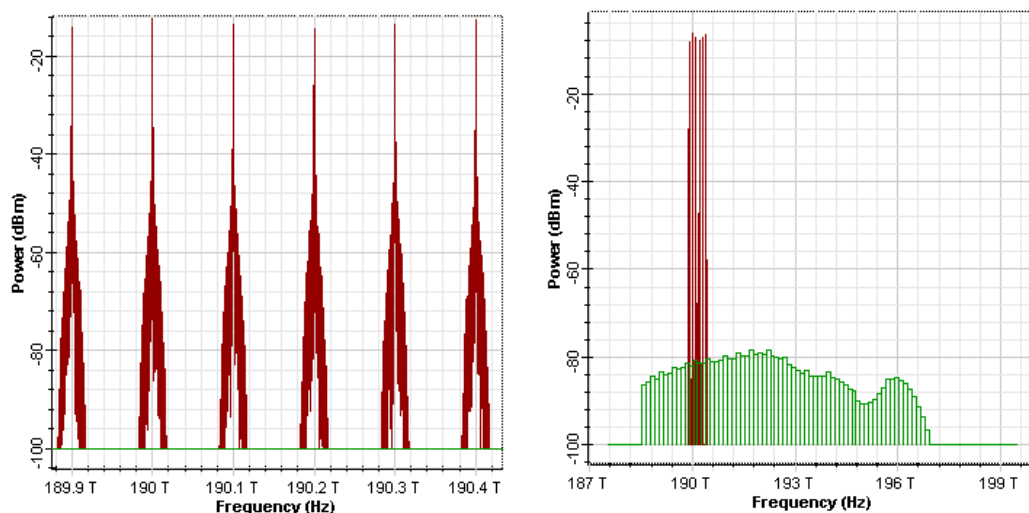
Dosažené výkonové úrovně v prvním kanále po aplikování zesilovacího prvku jsou zaznamenány v Tab. č. 6.4.

	Downstream		Upstream	
Parametr	Před zesilovačem	Za zesilovačem	Před zesilovačem	Za zesilovačem
P [dBm]	-9,604	-3,249	-18,444	1,971
OSNR [dB]	90,396	47,013	69,868	30,752
Rozdíl kanálů [dBm]	0,056	0,208	0,0004	5,67

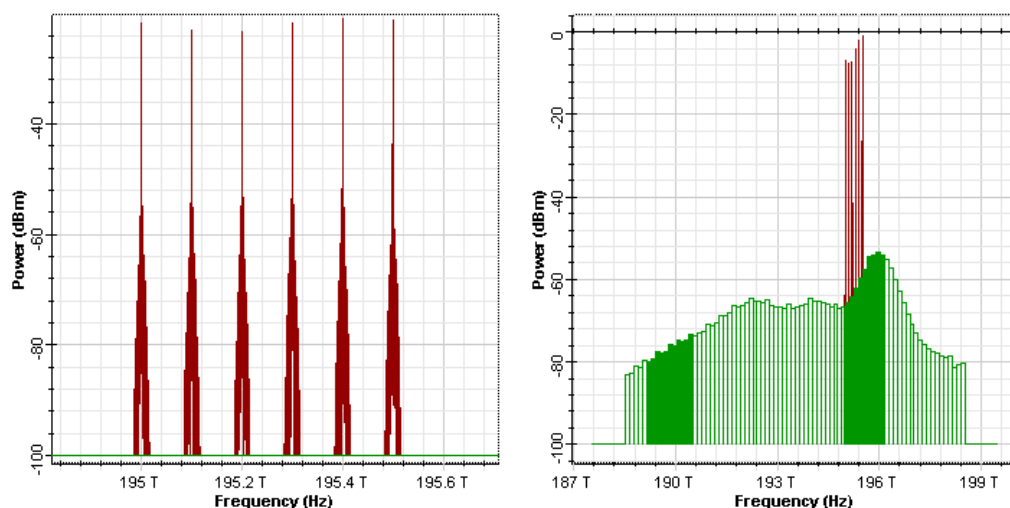
Tab. 6.4: Naměřené hodnoty parametrů pro vložený zesilovací prvek.

Navržený zesilovací prvek dodal optickému signálu v prvním kanálu WDM-PON sítě zisk v downstreamu 6,36 dB a v upstreamu 20,42 dB.

Optické spektrum s přídavným šumem před a za zesilovačem je možné vidět na Obr. č. 6.13; Obr. č. 6.14.



Obr. 6.13: Optické spektrum před a za zesilovačem pro směr downstream.

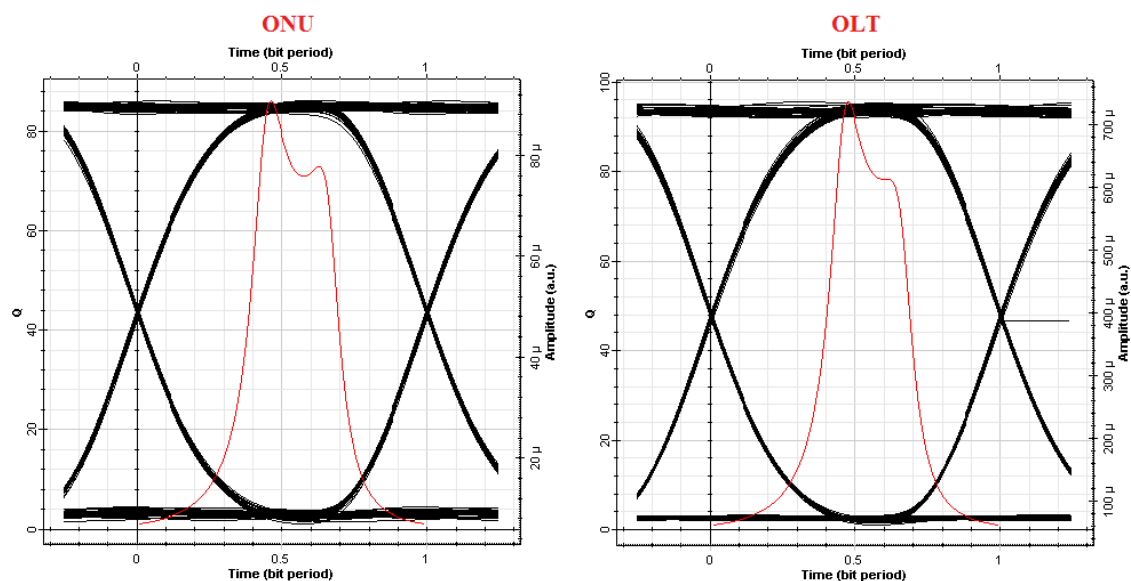


Obr. 6.14: Optické spektrum před a za zesilovačem pro směr upstream.

Kvalitativní parametry Q-faktor a BER, dosáhly po vložení zesilovacího prvku hodnot (viz Tab. č. 6.5) a jim odpovídají diagramy oka vykreslené na Obr. č. 6.15.

Parametr	Downstream	Upstream
Q-faktor [-]	86,129	95,561
BER [-]	0	0

Tab. 6.5: Naměřené hodnoty kvalitativních parametrů pro vložený zesilovací prvek.



Obr. 6.15: Diagramy oka na obou koncích přístupové sítě s vloženým zesilovacím prvkem.

Požadovaná bitová chybovost  $BER = 10^{-12}$  v jednom ze směrů byla pro navržený model s aplikovaným zesilovacím prvkem dosažena při vzdálenosti optické trasy 63 km. Při takto nastavené vzdálenosti dosáhly kvalitativní parametry hodnot (viz Tab. č. 6.6).

Parametr	Downstream	Upstream
Q-faktor [-]	7,344	24,638
BER [-]	$9,98 \cdot 10^{-12}$	$2,29 \cdot 10^{-134}$

Tab. 6.6: Naměřené hodnoty kvalitativních parametrů pro maximální dosah.

### RAMANŮV ZESILOVAČ

V dalším scénáři pro první umístění zesilovače se do trasy místo EDFA implementoval Ramanův zesilovač, jehož model je blíže specifikován v podkapitole 6.2.1.

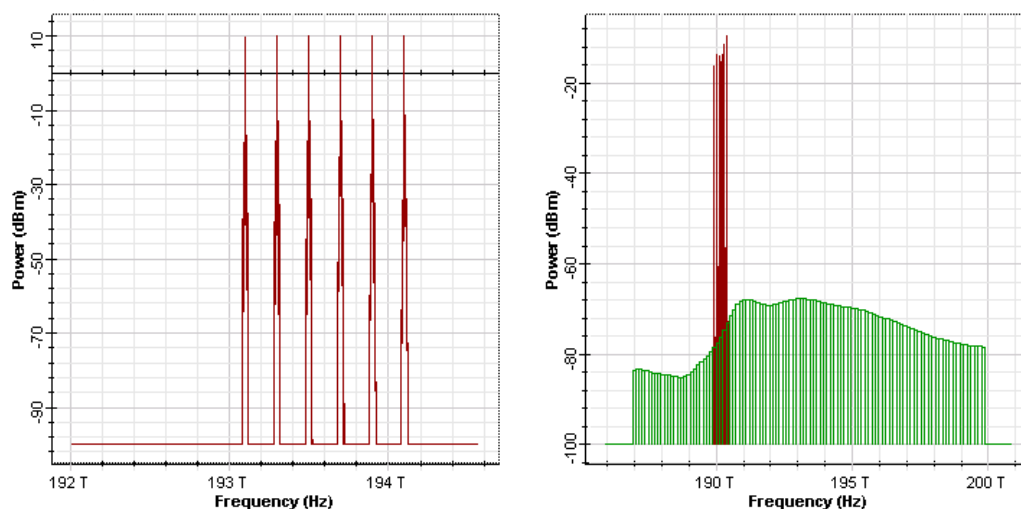
Dosažené hodnoty výkonových úrovní v prvním kanále po aplikování zesilovacího prvku jsou zaznamenány v Tab. č. 6.7.

	Downstream		Upstream	
Parametr	Před zesilovačem	Za zesilovačem	Před zesilovačem	Za zesilovačem
P [dBm]	-9,604	-6,255	-18,444	-11,631
OSNR [dB]	90,396	35,688	81,556	27,925
Rozdíl kanálů [dBm]	0,056	5,447	0,0004	0,95

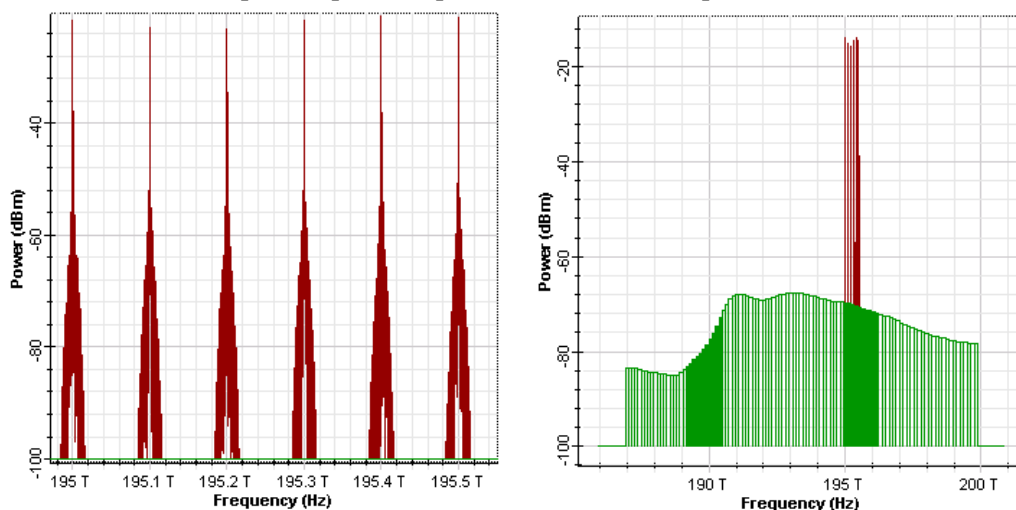
Tab. 6.7: Naměřené hodnoty parametrů pro vložený zesilovací prvek.

Navržený zesilovací prvek dodal optickému signálu v prvním kanálu zisk v downstreamu 3,35 dB a v upstreamu 6,81 dB.

Optické spektrum s přídavným šumem před a za zesilovačem je možné vidět na Obr. č. 6.16; Obr. č. 6.17.



Obr. 6.16: Optické spektrum před a za zesilovačem pro směr downstream.

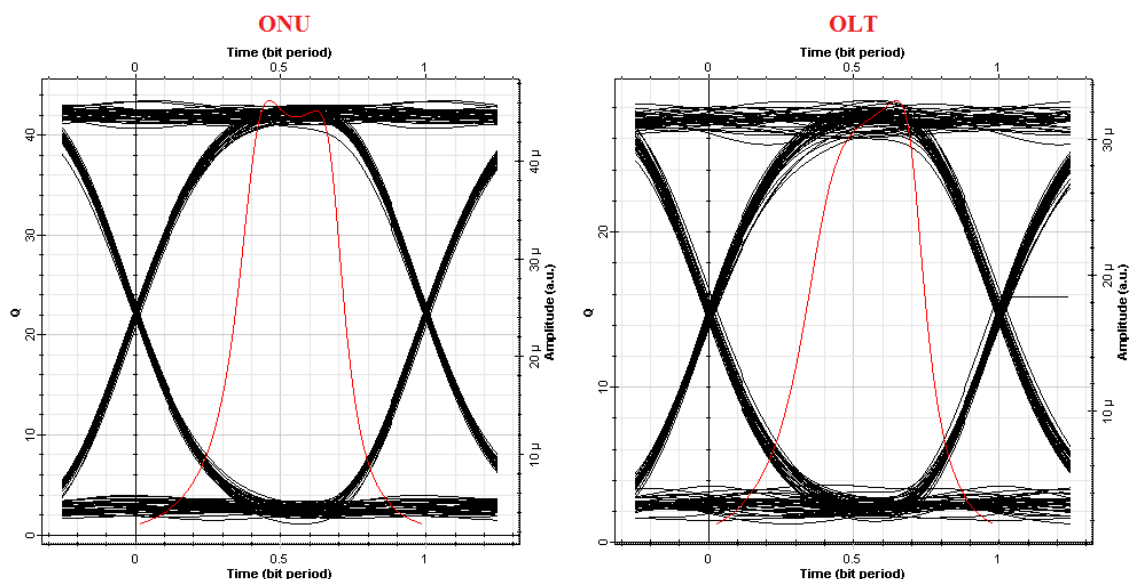


Obr. 6.17: Optické spektrum před a za zesilovačem pro směr upstream.

Kvalitativní parametry Q-faktor a BER, dosáhly po vložení zesilovacího prvku hodnot (viz Tab. č. 6.8) a jim odpovídají diagramy oka vykreslené na Obr. č. 6.18.

Parametr	Downstream	Upstream
Q-faktor [-]	43,459	28,457
BER [-]	0	$1,98 \cdot 10^{-178}$

Tab. 6.8: Naměřené hodnoty kvalitativních parametrů pro vložený zesilovací prvek.



Obr. 6.18: Diagramy oka na obou koncích přístupové sítě s vloženým zesilovacím prvkem.

Požadovaná bitová chybovost  $BER = 10^{-12}$  v jednom ze směrů byla pro navrhnutý model s aplikovaným zesilovacím prvkem dosažena při vzdálenosti optické trasy 44 km. Při takto nastavené vzdálenosti dosáhly kvalitativní parametry hodnot (viz Tab. č. 6.9).

Parametr	Downstream	Upstream
Q-faktor [-]	9,880	6,912
BER [-]	$2,55 \cdot 10^{-23}$	$3,27 \cdot 10^{-12}$

Tab. 6.9: Naměřené hodnoty kvalitativních parametrů pro maximální dosah.

### SOA

V posledním scénáři pro první umístění zesilovače se do trasy implementoval SOA zesilovač, jehož model je popsán v podkapitole 6.2.1. Ovšem tento zesilovač optický signál vůbec nezesiloval z důvodu velkých výkonových úrovní na jeho vstupu (neustále pracoval v saturačním režimu). Bylo tedy nutné před něj umístit optický útlumový článek, který signál před vstupem do zesilovače utlumil. V downstreamu měl útlumový člen hodnotu 20 dB v upstreamu pak 15 dB.

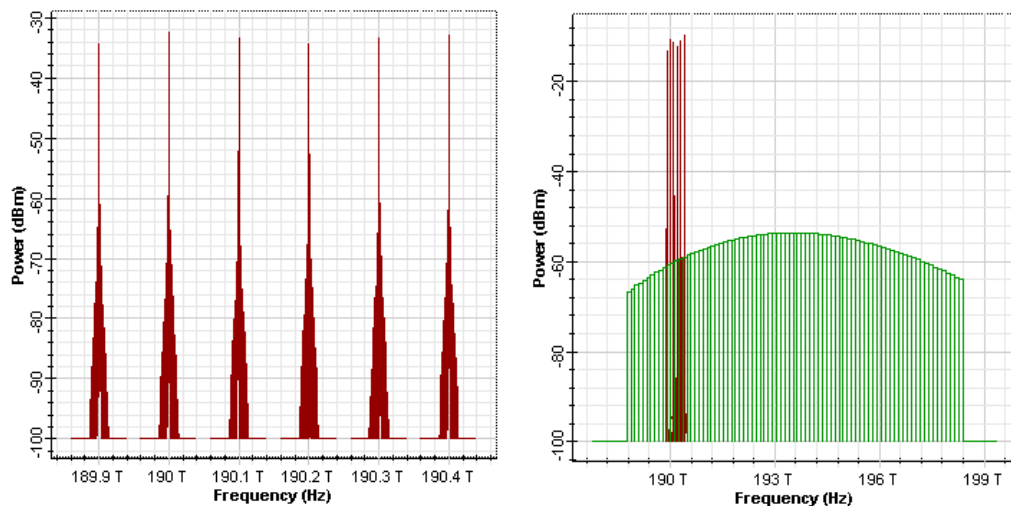
Dosažené hodnoty výkonových úrovní v prvním kanále po aplikování zesilovacího prvku s útlumovým členem jsou zaznamenány v Tab. č. 6.10.

Parametr	Downstream		Upstream	
	Před zesilovačem	Za zesilovačem	Před zesilovačem	Za zesilovačem
P [dBm]	-29,604	-6,453	-33,444	-9,47
OSNR [dB]	70,396	21,48	66,556	14,669
Rozdíl kanálů [dBm]	0,056	2,109	0,0004	1,24

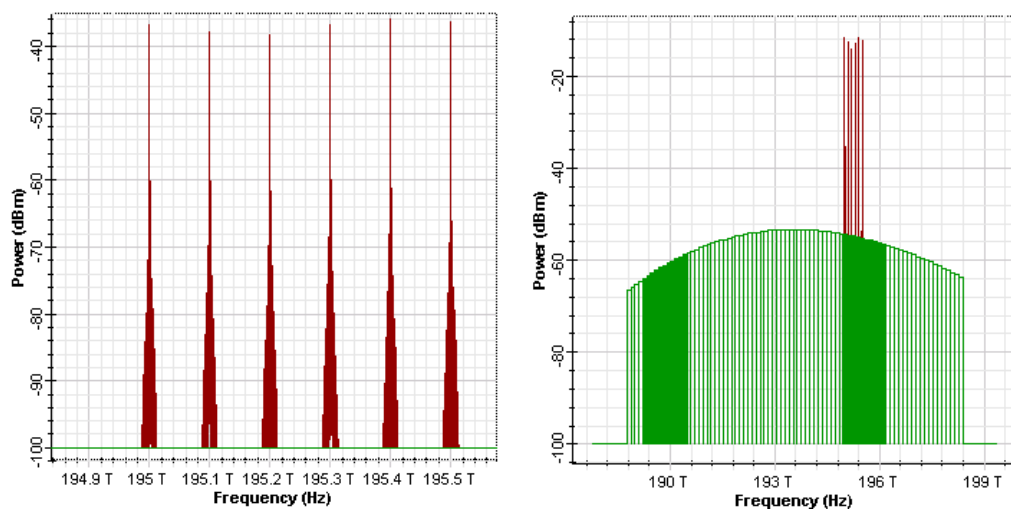
Tab. 6.10: Naměřené hodnoty parametrů pro vložený zesilovací prvek.

Navržený zesilovací prvek dodal optickému signálu v prvním kanálu zisk v downstreamu 23,15 dB a v upstreamu 23,97 dB.

Optické spektrum s přídavným šumem před a za zesilovačem je možné vidět na Obr. č. 6.19; Obr. č. 6.20.



Obr. 6.19: Optické spektrum před a za zesilovačem pro směr downstream.

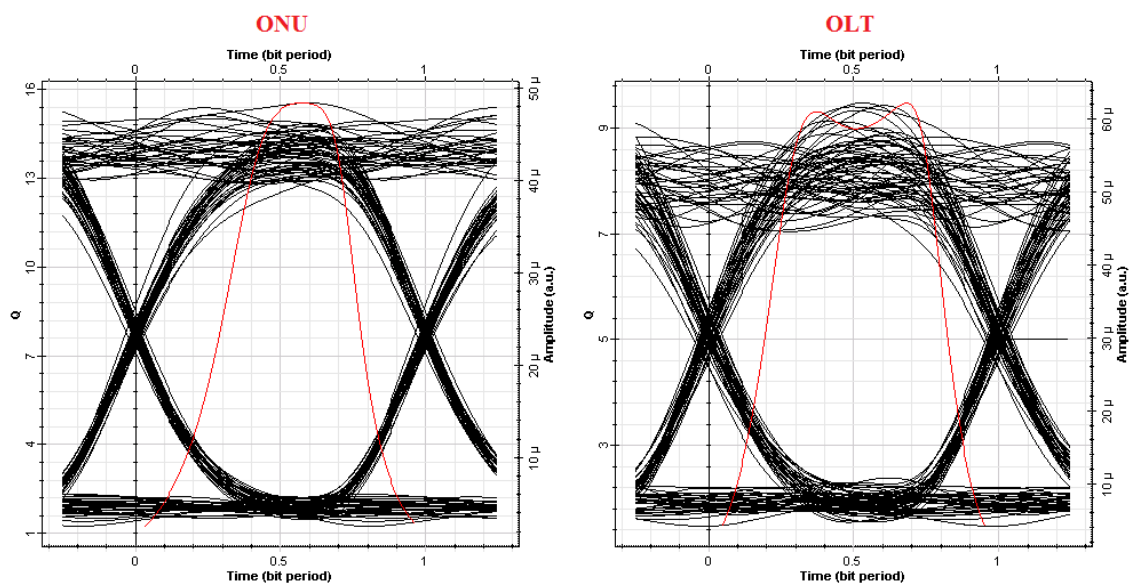


Obr. 6.20: Optické spektrum před a za zesilovačem pro směr upstream.

Kvalitativní parametry Q-faktor a BER, dosáhly po vložení zesilovacího prvku hodnot (viz Tab. č. 6.11) a jim odpovídají diagramy oka vykreslené na Obr. č. 6.21.

Parametr	Downstream	Upstream
Q-faktor [-]	15,548	9,474
BER [-]	$7,16 \cdot 10^{-55}$	$1,18 \cdot 10^{-21}$

Tab. 6.11: Naměřené hodnoty kvalitativních parametrů pro vložený zesilovací prvek.



Obr. 6.21: Diagramy oka na obou koncích přístupové sítě s vloženým zesilovacím prvkem.

Požadovaná bitová chybovost  $BER = 10^{-12}$  v jednom ze směrů byla pro navržený model s aplikovaným zesilovacím prvkem a útlumovým členem dosažena při vzdálenosti optické trasy 38 km. Při takto nastavené vzdálenosti dosáhly kvalitativní parametry hodnot (viz Tab. č. 6.12).

Parametr	Downstream	Upstream
Q-faktor [-]	7,330	7,054
BER [-]	$1,13 \cdot 10^{-13}$	$6,24 \cdot 10^{-12}$

Tab. 6.12: Naměřené hodnoty kvalitativních parametrů pro maximální dosah.

### 6.2.2.2 Druhé umístění zesilovače

#### EDFA

Další umístění zesilovacího prvku odpovídá průběžnému zesilovači v obou směrech provozu, kdy zisk jednotlivých EDFA zesilovačů je nastaven na 20 dB. Hodnota zisku odpovídá hodnotám nastaveným při měření na reálné síti.

Dosažené výkonové úrovně v prvním kanále po aplikování zesilovacího prvku jsou zaznamenány v Tab. č. 6.13.

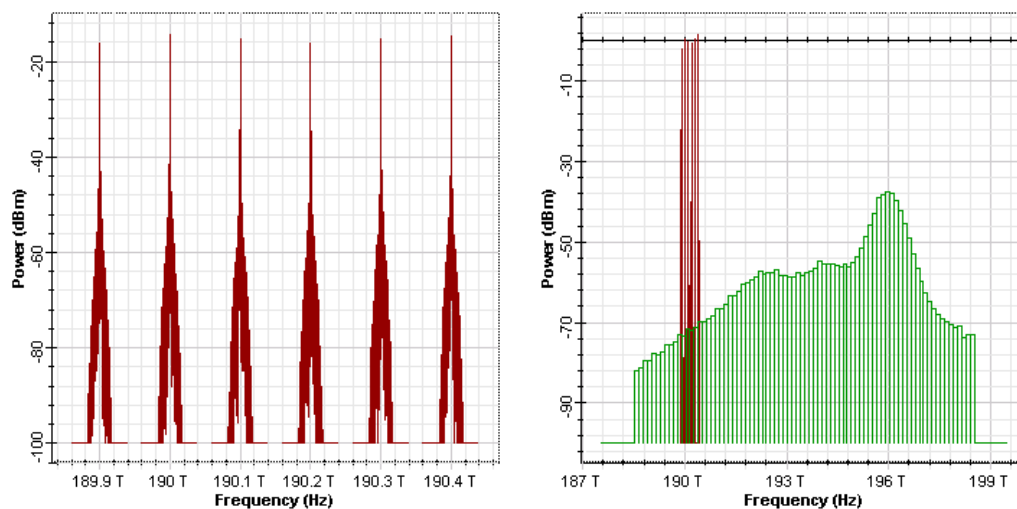
Parametr	Downstream		Upstream	
	Před zesilovačem	Za zesilovačem	Před zesilovačem	Za zesilovačem
P [dBm]	-11,524	4,827	-16,524	4,417
OSNR [dB]	88,476	45,094	66,933	32,779
Rozdíl kanálů [dBm]	0,056	2,209	0,0002	7,14

Tab. 6.13: Naměřené hodnoty parametrů pro vložený zesilovací prvek.

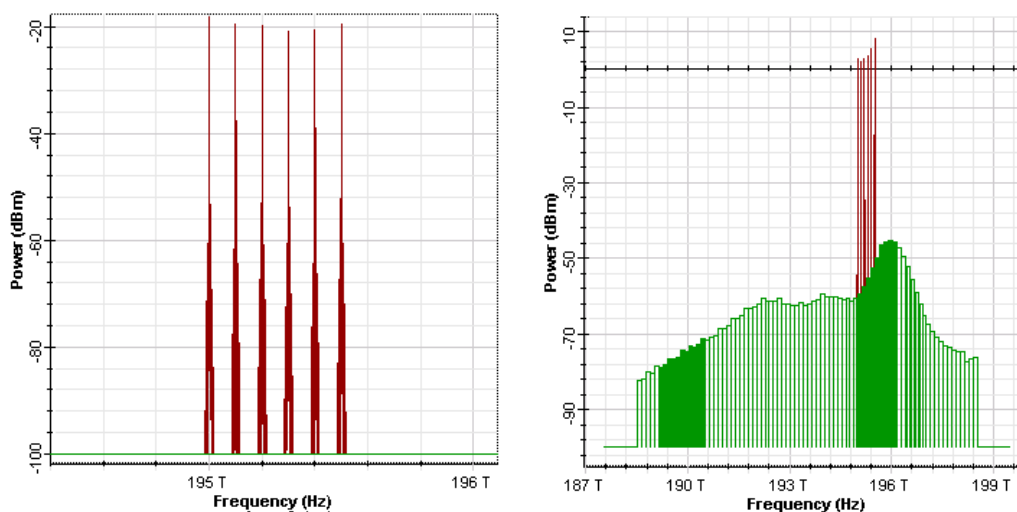


Navržený zesilovací prvek dodal optickému signálu v prvním kanálu zisk v downstreamu 16,35 dB a v upstreamu 20,94 dB.

Optické spektrum s přídavným šumem před a za zesilovačem je možné vidět na Obr. č. 6.22; Obr. č. 6.23.



Obr. 6.22: Optické spektrum před a za zesilovačem pro směr downstream.

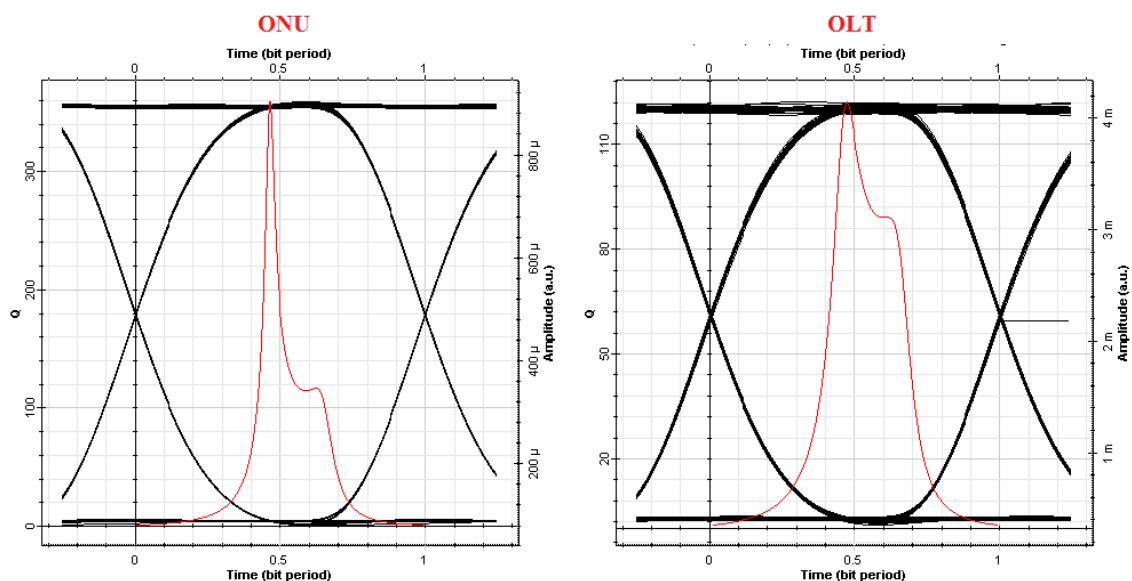


Obr. 6.23: Optické spektrum před a za zesilovačem pro směr upstream.

Kvalitativní parametry Q-faktor a BER, dosáhly po vložení zesilovacího prvku hodnot (viz Tab. č. 6.14) a jim odpovídají diagramy oka vykreslené na Obr. č. 6.24.

Parametr	Downstream	Upstream
Q-faktor [-]	358,998	122,178
BER [-]	0	0

Tab. 6.14: Naměřené hodnoty kvalitativních parametrů pro vložený zesilovací prvek.



Obr. 6.24: Diagramy oka na obou koncích přístupové sítě s vloženým zesilovacím prvkem.

Požadovaná bitová chybovost  $BER = 10^{-12}$  v jednom ze směrů byla pro navržený model s aplikovaným zesilovacím prvkem dosažena při vzdálenosti optické trasy 70 km. Při takto nastavené vzdálenosti dosáhly kvalitativní parametry hodnot (viz Tab. č. 6.15).

Parametr	Downstream	Upstream
Q-faktor [-]	6,934	12,544
BER [-]	$2,04 \cdot 10^{-12}$	$1,79 \cdot 10^{-36}$

Tab. 6.15: Naměřené hodnoty kvalitativních parametrů pro maximální dosah.

### RAMANŮV ZESILOVAČ

V dalším scénáři pro druhé umístění zesilovače se do trasy místo EDFA implementoval Ramanův zesilovač, jehož model je blíže specifikován v podkapitole 6.2.1.

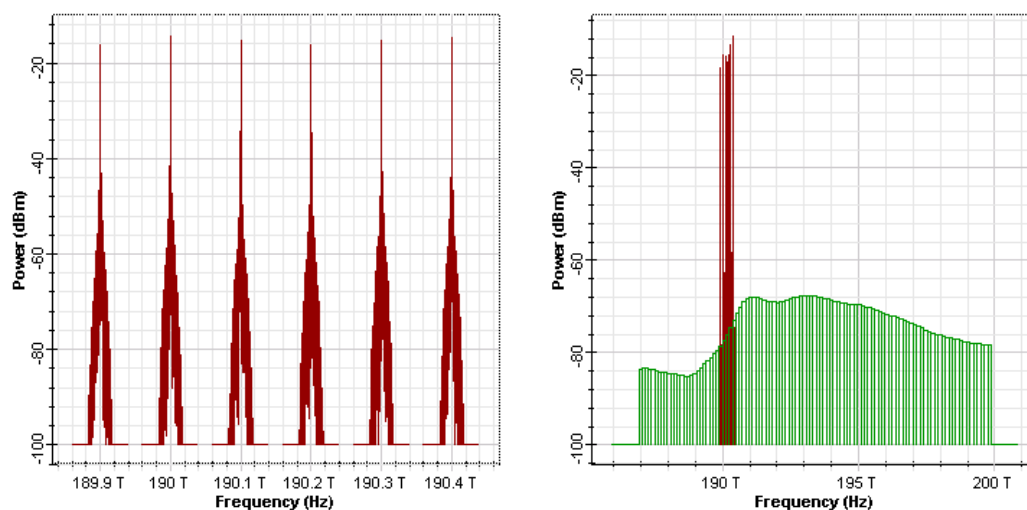
Dosažené hodnoty výkonových úrovní v prvním kanále po aplikování zesilovacího prvku jsou zaznamenány v Tab. č. 6.16.

	Downstream		Upstream	
Parametr	Před zesilovačem	Za zesilovačem	Před zesilovačem	Za zesilovačem
P [dBm]	-11,524	-8,161	-16,524	-9,726
OSNR [dB]	88,476	33,771	83,476	29,842
Rozdíl kanálů [dBm]	0,056	5,453	0,0002	0,949

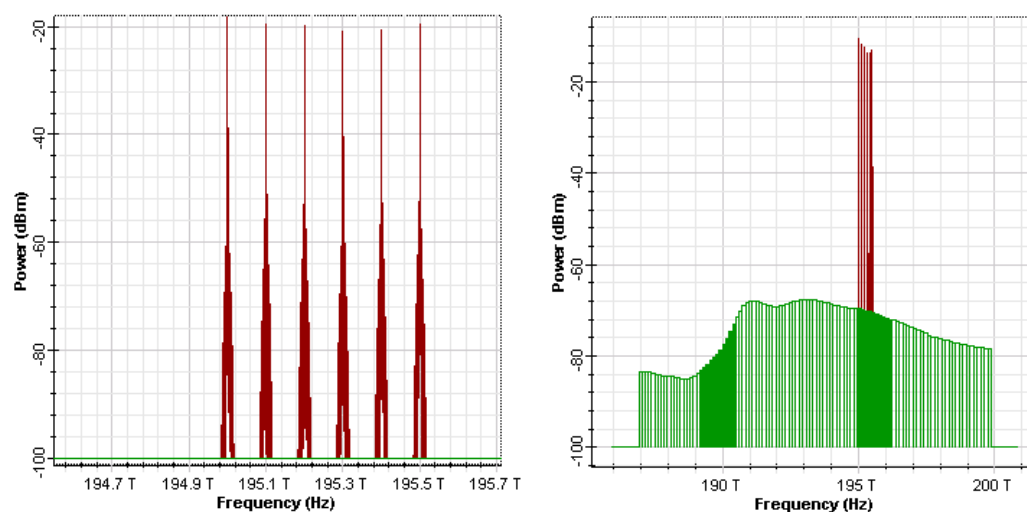
Tab. 6.16: Naměřené hodnoty parametrů pro vložený zesilovací prvek.

Navržený zesilovací prvek dodal optickému signálu v prvním kanálu zisk v downstreamu 3,36 dB a v upstreamu 6,80 dB.

Optické spektrum s přídavným šumem před a za zesilovačem je možné vidět na Obr. č. 6.25; Obr. č. 6.26.



Obr. 6.25: Optické spektrum před a za zesilovačem pro směr downstream.

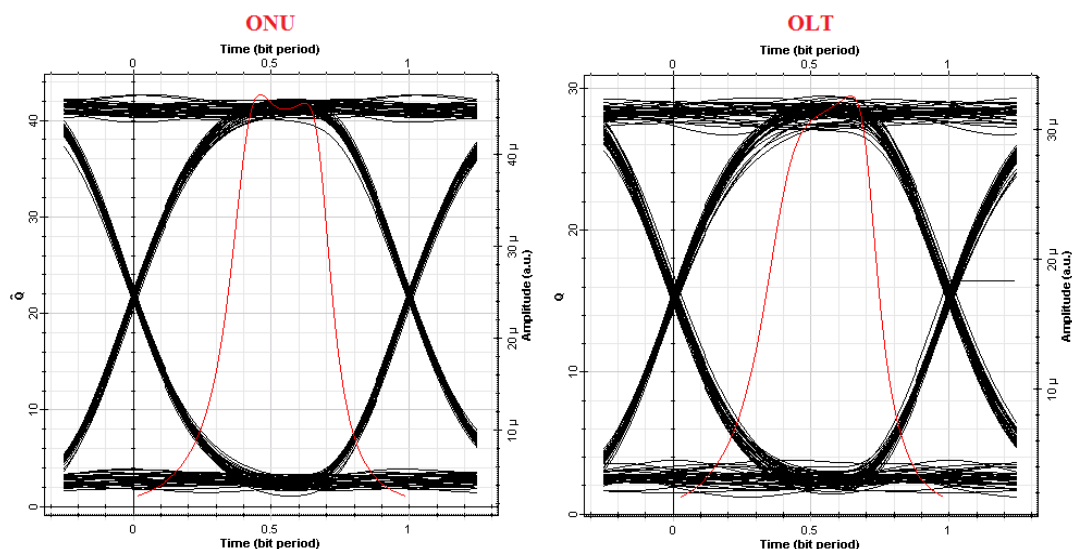


Obr. 6.26: Optické spektrum před a za zesilovačem pro směr upstream.

Kvalitativní parametry Q-faktor a BER, dosáhly po vložení zesilovacího prvku hodnot (viz Tab. č. 6.17) a jim odpovídají diagramy oka vykreslené na Obr. č. 6.27.

Parametr	Downstream	Upstream
Q-faktor [-]	42,629	29,430
BER [-]	0	$1,14 \cdot 10^{-190}$

Tab. 6.17: Naměřené hodnoty kvalitativních parametrů pro vložený zesilovací prvek.



Obr. 6.27: Diagramy oka na obou koncích přístupové sítě s vloženým zesilovacím prvkem.

Požadovaná bitová chybovost  $BER = 10^{-12}$  v jednom ze směrů byla pro navrhnutý model s aplikovaným zesilovacím prvkem dosažena při vzdálenosti optické trasy 43 km. Při takto nastavené vzdálenosti dosáhly kvalitativní parametry hodnot (viz Tab. č. 6.18).

Parametr	Downstream	Upstream
Q-faktor [-]	10,436	7,086
BER [-]	$8,44 \cdot 10^{-26}$	$3,29 \cdot 10^{-12}$

Tab. 6.18: Naměřené hodnoty kvalitativních parametrů pro maximální dosah.

## SOA

V posledním scénáři pro druhé umístění zesilovače se do trasy implementoval SOA zesilovač, jehož model je blíže popsán v podkapitole 6.2.1. Ovšem tento zesilovač optický signál vůbec nezsiloval z důvodu velkých výkonových úrovní na jeho vstupu (neustále pracoval v saturačním režimu). Bylo tedy nutné před něj umístit optický útlumový článek, který signál před vstupem do zesilovače utlumil na požadované hodnoty. V downstreamu měl útlumový člen hodnotu 15 dB v upstreamu pak 10 dB.

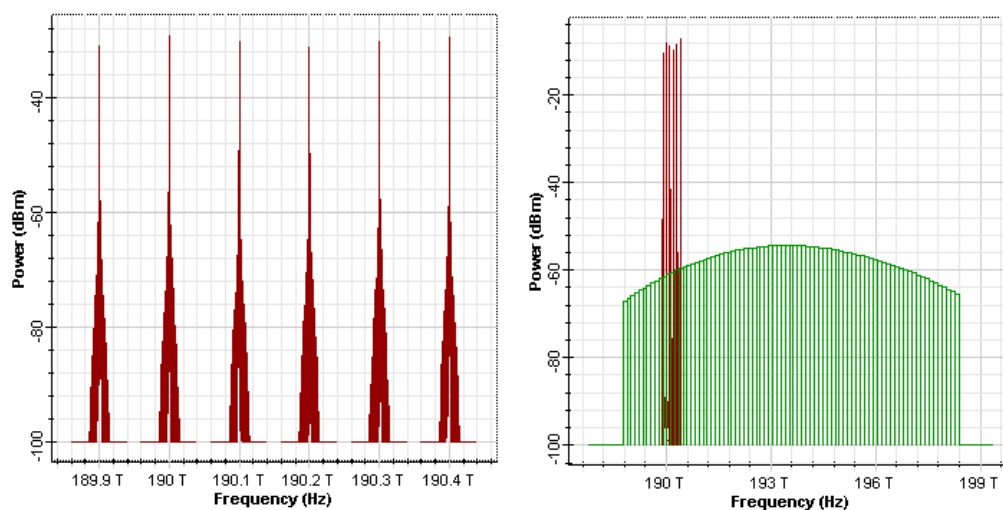
Dosažené hodnoty výkonových úrovní v prvním kanále po aplikování zesilovacího prvku s útlumovým členem jsou zaznamenány v Tab. č. 6.19.

	Downstream		Upstream	
Parametr	Před zesilovačem	Za zesilovačem	Před zesilovačem	Za zesilovačem
P [dBm]	-26,524	-3,863	-26,524	-4,560
OSNR [dB]	73,476	24,715	73,476	21,479
Rozdíl kanálů [dBm]	0,056	1,998	0,0002	1,616

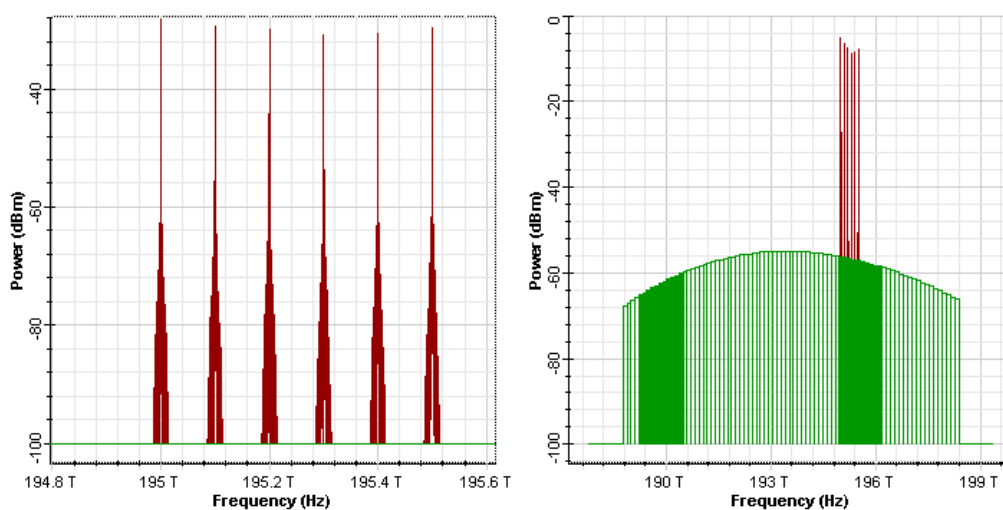
Tab. 6.19: Naměřené hodnoty parametrů pro vložený zesilovací prvek.

Navržený zesilovací prvek dodal optickému signálu v prvním kanálu zisk v downstreamu 22,66 dB a v upstreamu 21,96 dB.

Optické spektrum s přídavným šumem před a za zesilovačem je vidět na Obr. č. 6.28; Obr. č. 6.29.



Obr. 6.28: Optické spektrum před a za zesilovačem pro směr downstream.

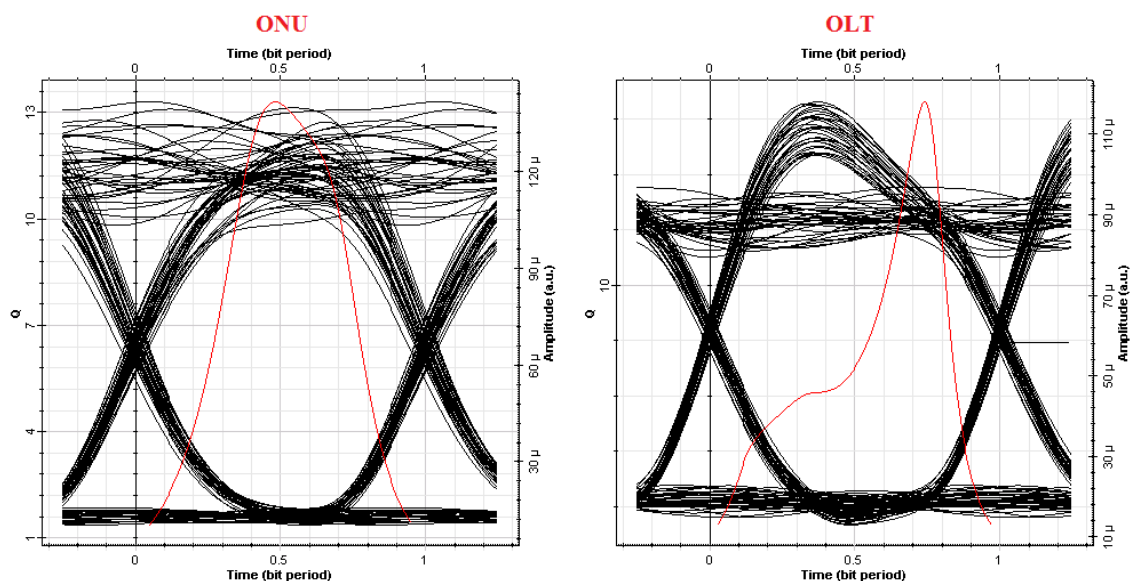


Obr. 6.29: Optické spektrum před a za zesilovačem pro směr upstream.

Kvalitativní parametry Q-faktor a BER, dosáhly po vložení zesilovacího prvku hodnot (viz Tab. č. 6.20) a jim odpovídají diagramy oka vykreslené na Obr. č. 6.30.

Parametr	Downstream	Upstream
Q-faktor [-]	13,301	16,627
BER [-]	$8,86 \cdot 10^{-41}$	$2,08 \cdot 10^{-62}$

Tab. 6.20: Naměřené hodnoty kvalitativních parametrů pro vložený zesilovací prvek.



Obr. 6.30: Diagramy oka na obou koncích přístupové sítě s vloženým zesilovacím prvkem.

Požadovaná bitová chybovost  $BER = 10^{-12}$  v jednom ze směrů byla pro navržený model s aplikovaným zesilovacím prvkem a útlumovým členem dosažena při vzdálenosti optické trasy 45 km. Při takto nastavené vzdálenosti dosáhly kvalitativní parametry hodnot (viz Tab. č. 6.21).

Parametr	Downstream	Upstream
Q-faktor [-]	7,765	7,031
BER [-]	$4,02 \cdot 10^{-15}$	$6,98 \cdot 10^{-12}$

Tab. 6.21: Naměřené hodnoty kvalitativních parametrů pro maximální dosah.

### 6.2.2.3 Třetí umístění zesilovače

#### EDFA

Poslední umístění zesilovacího prvku do optické trasy odpovídá předzesilovači ve směru downstream s nastaveným ziskem 20 dB a výkonovému zesilovači ve směru upstream s nastavenou hodnotou zisku 10 dB. Hodnota zisku odpovídá hodnotám nastaveným na zesilovači při měření na reálné síti.

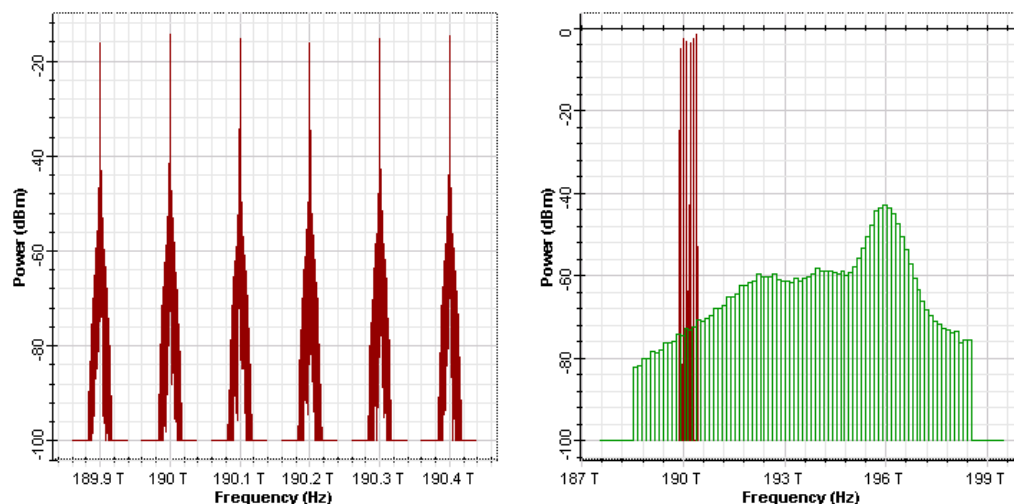
Dosažené výkonové úrovně v prvním kanále po aplikování zesilovacího prvku jsou zaznamenány v Tab. č. 6.22.

Parametr	Downstream		Upstream	
	Před zesilovačem	Za zesilovačem	Před zesilovačem	Za zesilovačem
P [dBm]	-13,444	1,736	-14,604	4,442
OSNR [dB]	86,556	43,154	69,854	35,724
Rozdíl kanálů [dBm]	0,056	1,974	0,0002	6,714

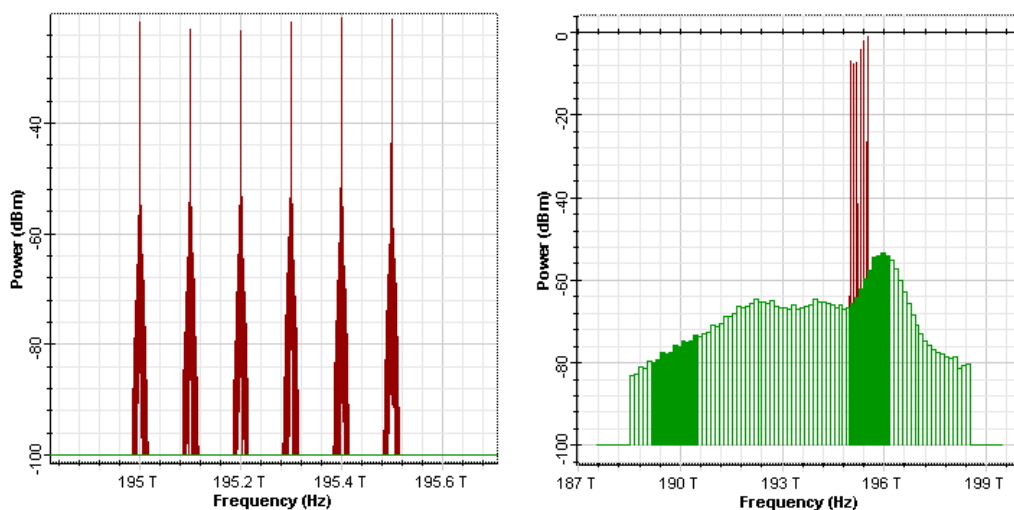
Tab. 6.22: Naměřené hodnoty parametrů pro vložený zesilovací prvek.

Navržený zesilovací prvek dodal optickému signálu v prvním kanálu zisk v downstreamu 15,18 dB a v upstreamu 19,05 dB.

Optické spektrum s přídavným šumem před a za zesilovačem je vidět na Obr. č. 6.31; Obr. č. 6.32.



Obr. 6.31: Optické spektrum před a za zesilovačem pro směr downstream.

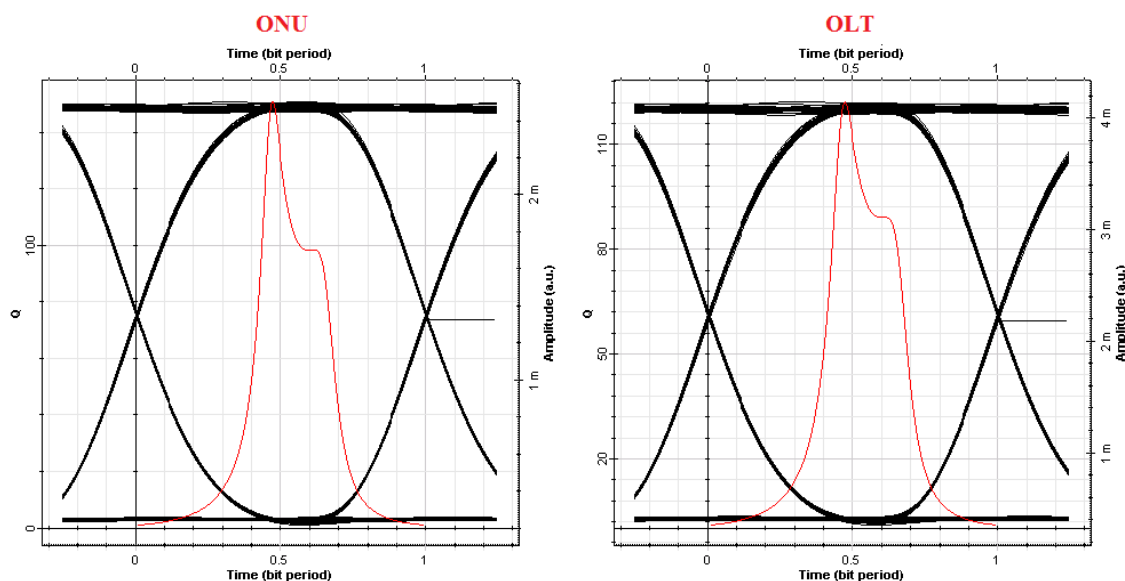


Obr. 6.32: Optické spektrum před a za zesilovačem pro směr upstream.

Kvalitativní parametry Q-faktor a BER, dosáhly po vložení zesilovacího prvku hodnot (viz Tab. č. 6.23) a jim odpovídají diagramy oka vykreslené na Obr. č. 6.33.

Parametr	Downstream	Upstream
Q-faktor [-]	289,078	150,741
BER [-]	0	0

Tab. 6.23: Naměřené hodnoty kvalitativních parametrů pro vložený zesilovací prvek.



Obr. 6.33: Diagramy oka na obou koncích přístupové sítě s vloženým zesilovacím prvkem.

Požadovaná bitová chybovost  $BER = 10^{-12}$  v jednom ze směrů byla pro navržený model s aplikovaným zesilovacím prvkem dosažena při vzdálenosti optické trasy 91 km. Při takto nastavené vzdálenosti dosáhly kvalitativní parametry hodnot (viz Tab. č. 6.24).

Parametr	Downstream	Upstream
Q-faktor [-]	7,049	39,265
BER [-]	$4,12 \cdot 10^{-12}$	0

Tab. 6.24: Naměřené hodnoty kvalitativních parametrů pro maximální dosah.

### RAMANŮV ZESILOVAČ

V dalším scénáři pro třetí umístění zesilovače se do trasy místo EDFA implementoval Ramanův zesilovač, jenž je popsán v podkapitole 6.2.1.

Dosažené hodnoty výkonových úrovní v prvním kanále po aplikování zesilovacího prvku jsou zaznamenány v Tab. č. 6.25.

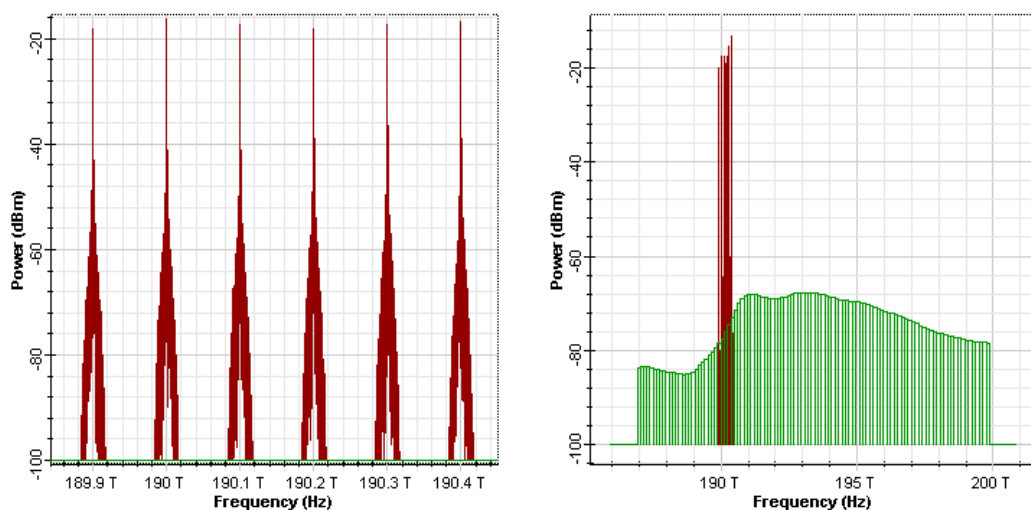
	Downstream		Upstream	
Parametr	Před zesilovačem	Za zesilovačem	Před zesilovačem	Za zesilovačem
P [dBm]	-13,444	-10,074	-14,604	-7,828
OSNR [dB]	86,556	31,853	69,868	31,758
Rozdíl kanálů [dBm]	0,056	5,458	0,0002	0,948

Tab. 6.25: Naměřené hodnoty parametrů pro vložený zesilovací prvek.

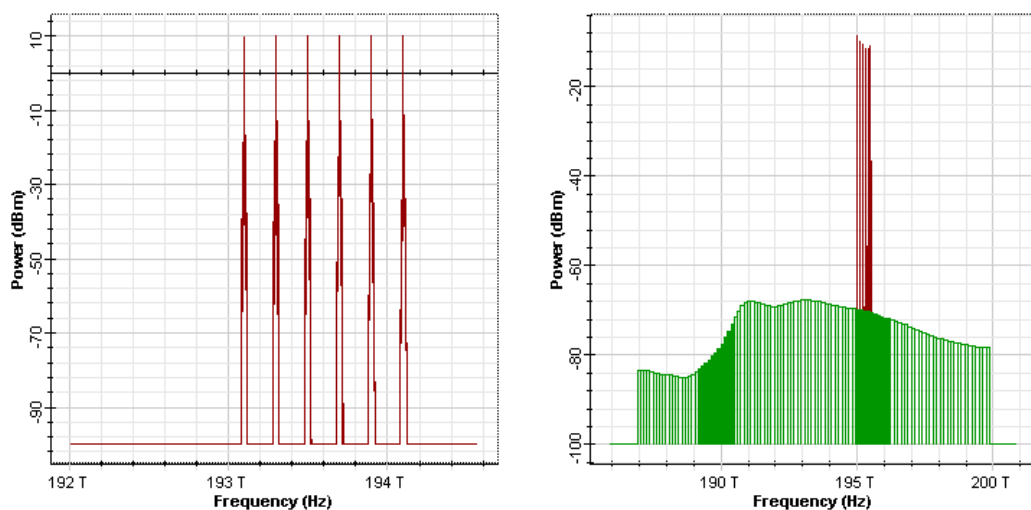


Navržený zesilovací prvek dodal optickému signálu zisk v downstreamu 3,37 dB a v upstreamu 6,78 dB.

Optické spektrum s přídatným šumem před a za zesilovačem je vidět na Obr. č. 6.34; Obr. č. 6.35.



Obr. 6.34: Optické spektrum před a za zesilovačem pro směr downstream.

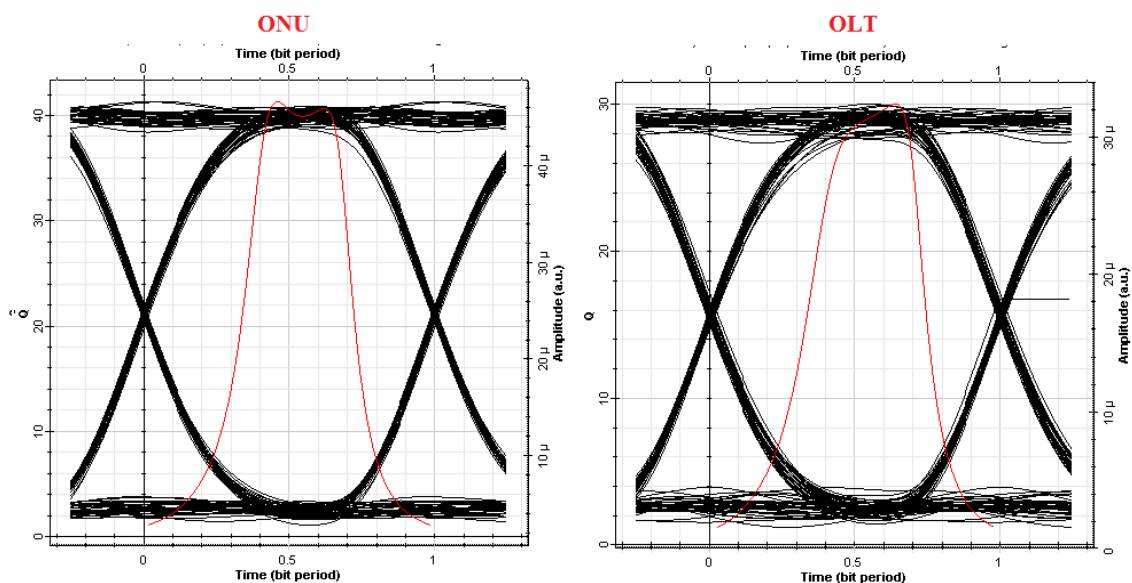


Obr. 6.35: Optické spektrum před a za zesilovačem pro směr upstream.

Kvalitativní parametry Q-faktor a BER, dosáhly po vložení zesilovacího prvku hodnot (viz Tab. č. 6.26) a jim odpovídají diagramy oka vykreslené na Obr. č. 6.36.

Parametr	Downstream	Upstream
Q-faktor [-]	41,296	30,031
BER [-]	0	$1,91 \cdot 10^{-198}$

Tab. 6.26: Naměřené hodnoty kvalitativních parametrů pro vložený zesilovací prvek.



Obr. 6.36: Diagramy oka na obou koncích přístupové sítě s vloženým zesilovacím prvkem.

Požadovaná bitová chybovost  $BER = 10^{-12}$  v jednom ze směrů byla pro navržený model s aplikovaným zesilovacím prvkem dosažena při vzdálenosti optické trasy 45 km. Při takto nastavené vzdálenosti dosáhly kvalitativní parametry hodnot (viz Tab. č. 6.27).

Parametr	Downstream	Upstream
Q-faktor [-]	9,275	6,993
BER [-]	$8,85 \cdot 10^{-21}$	$1,03 \cdot 10^{-12}$

Tab. 6.27: Naměřené hodnoty kvalitativních parametrů pro maximální dosah.

## SOA

V posledním scénáři pro třetí umístění zesilovače se do trasy implementoval SOA zesilovač, jenž je popsán v podkapitole 6.2.1. Ovšem tento zesilovač optický signál vůbec nezesiloval z důvodu velkých výkonových úrovní na jeho vstupu (neustále pracoval v saturačním režimu). Bylo tedy nutné před něj umístit optický útlumový článek, který signál před vstupem do zesilovače utlumil. V downstreamu měl útlumový člen hodnotu 15 dB v upstreamu pak 15 dB.

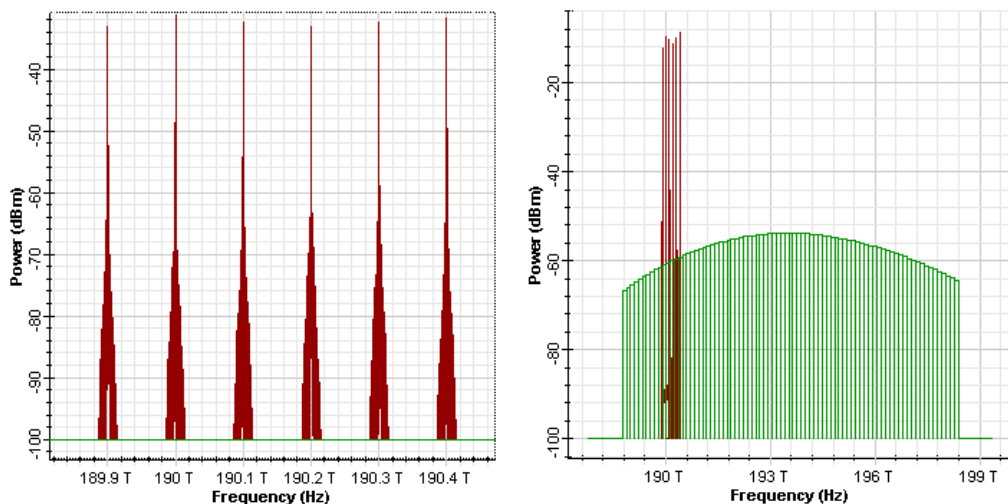
Dosažené hodnoty výkonových úrovní v prvním kanále po aplikování zesilovacího prvku s útlumovým členem jsou zaznamenány v Tab. č. 6.28.

	Downstream		Upstream	
Parametr	Před zesilovačem	Za zesilovačem	Před zesilovačem	Za zesilovačem
P [dBm]	-28,444	-5,432	-29,604	-6,734
OSNR [dB]	71,556	22,691	70,396	18,117
Rozdíl kanálů [dBm]	0,056	2,08	0,0002	1,31

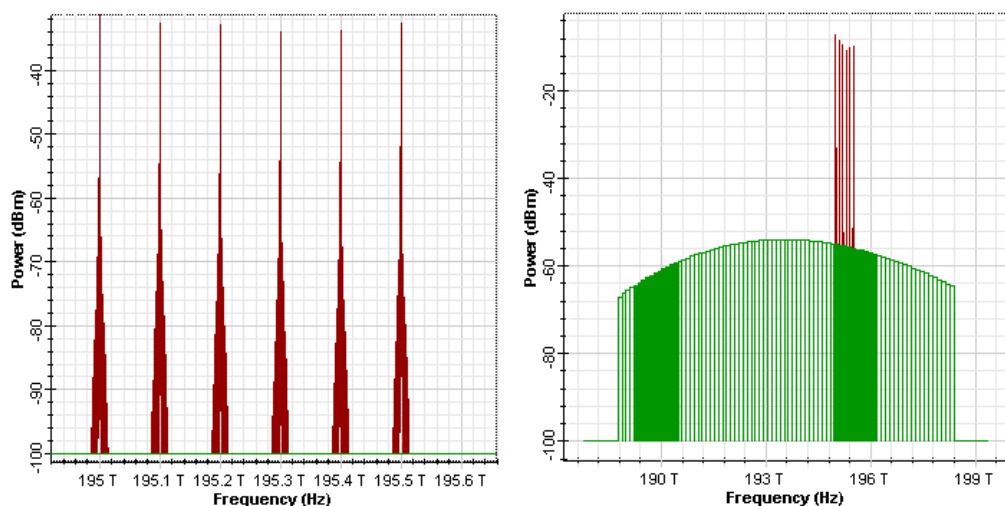
Tab. 6.28: Naměřené hodnoty parametrů pro vložený zesilovací prvek.

Navržený zesilovací prvek dodal optickému signálu zisk v downstreamu 23,01 dB a v upstreamu 22,87 dB.

Optické spektrum s přídavným šumem před a za zesilovačem je vidět na Obr. č. 6.37; Obr. č. 6.38.



Obr. 6.37: Optické spektrum před a za zesilovačem pro směr downstream.

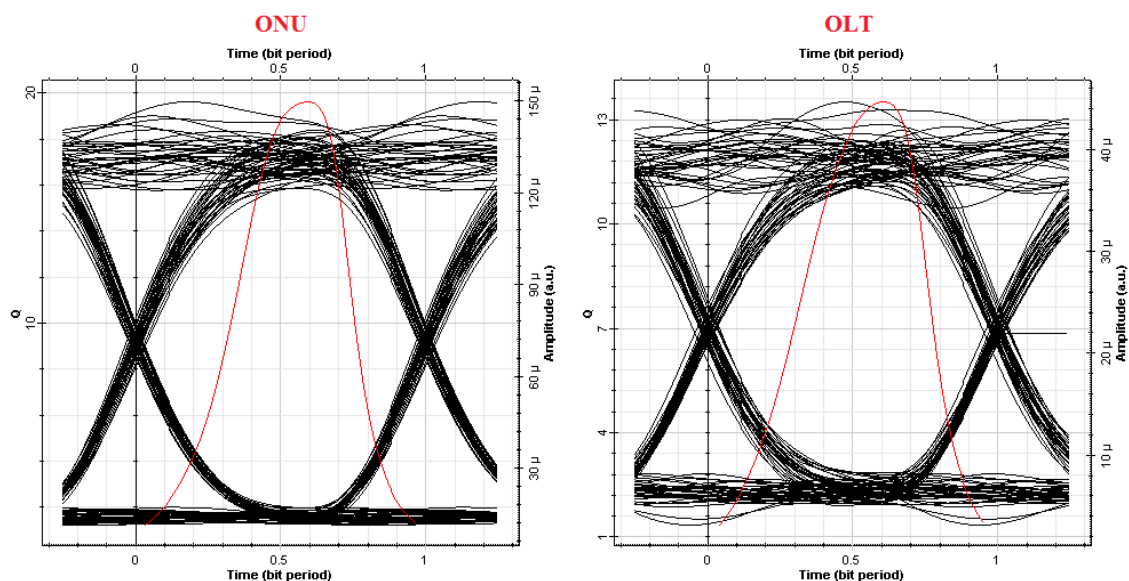


Obr. 6.38: Optické spektrum před a za zesilovačem pro směr upstream.

Kvalitativní parametry Q-faktor a BER, dosáhly po vložení zesilovacího prvku hodnot (viz Tab. č. 6.29) a jim odpovídají diagramy oka vykreslené na Obr. č. 6.39.

Parametr	Downstream	Upstream
Q-faktor [-]	19,619	13,512
BER [-]	$4,38 \cdot 10^{-86}$	$6,11 \cdot 10^{-42}$

Tab. 6.29: Naměřené hodnoty kvalitativních parametrů pro vložený zesilovací prvek.



Obr. 6.39: Diagramy oka na obou koncích přístupové sítě s vloženým zesilovacím prvkem.

Požadovaná bitová chybovost  $BER = 10^{-12}$  v jednom ze směrů byla pro navržený model s aplikovaným zesilovacím prvkem a útlumovým členem dosažena při vzdálenosti optické trasy 38 km. Při takto nastavené vzdálenosti dosáhly kvalitativní parametry hodnot (viz Tab. č. 6.30).

Parametr	Downstream	Upstream
Q-faktor [-]	17,353	6,776
BER [-]	$8,06 \cdot 10^{-68}$	$6,02 \cdot 10^{-12}$

Tab. 6.30: Naměřené hodnoty kvalitativních parametrů pro maximální dosah.

### 6.2.3 Zhodnocení dosažených výsledků

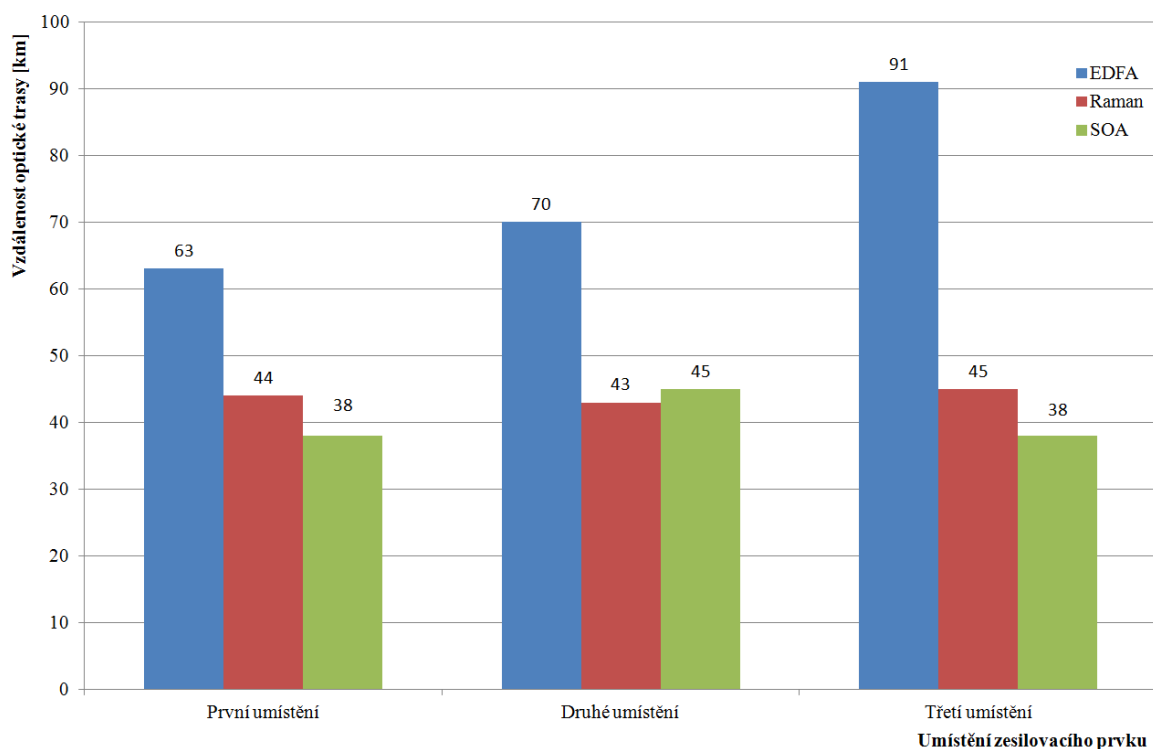
Po provedení všech simulací uvádím celkové zhodnocení dosažených výsledků, které byly získány pro symetrickou přenosovou rychlost 1,25 Gbit/s. Jedním z hlavních parametrů navržených modelů WDM-PON sítě je hodnota skutečného zisku optického signálu po průchodu zesilovacím prvkem, jenž byl odečten pro první kanál navrženého modelu (viz Tab. č. 6.31).

	První umístění		Druhé umístění		Třetí umístění	
	Downstream	Upstream	Downstream	Upstream	Downstream	Upstream
<b>EDFA</b>	6,36	20,42	16,35	20,94	15,18	19,05
<b>RAMAN</b>	3,35	6,81	3,36	6,80	3,37	6,78
<b>SOA</b>	23,15	23,97	22,66	21,96	23,01	22,87

Tab. 6.31: Odečtené hodnoty skutečného zisku [dB] optického signálu.

Z odečtených hodnot vyznačených v Tab. č. 6.31 je patrné, že nejvyššího zisku se dosáhlo po aplikování zesilovače typu SOA (kolem 22 dB). Těchto velkých hodnot je docíleno pouze za předpokladu umístění útlumového článku před zesilovačem. Avšak kvalitativní parametry sítě nedosahovaly takových hodnot, jako tomu bylo po zaimplementování zbývajících zesilovačů i maximální dosažená vzdálenost optické trasy neodpovídá uvedené příznivé hodnotě zisku. Dále je vhodné poukázat na fakt velkého rozdílu zisků v jednotlivých směrech u zesilovače typu EDFA. Tato difference pramení ze skutečnosti, že zesilovač dosahuje nejvyšších hodnot zisku v pracovním pásmu C. V pracovním pásmu L, ve kterém vysílá OLT jednotka WDM-PON platformy nedosahuje zdaleka tak příznivých zesilovacích schopností jako v pásmu C.

Na Obr. č. 40 jsou vyznačeny maximální dosahy optických tras pro jednotlivá umístění zesilovacích prvků. Z tohoto obrázku vyplívá, že nejvýhodnějším zesilovací prvek v sítích WDM-PON se jeví vláknový optický zesilovač.



Obr. 6.40: Maximální dosah optických tras pro jednotlivá umístění zesilovacích prvků.

## 7 Praktické měření

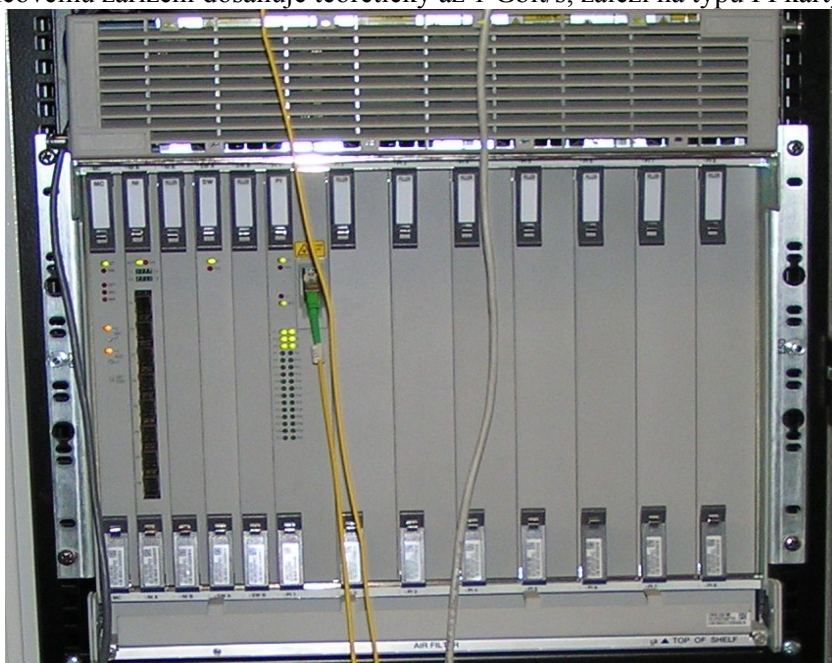
Poslední kapitola této diplomové práce se věnuje praktickému měření na reálné přístupové síti WDM-PON, která se nachází na Vysoké škole báňské – Technické univerzitě Ostrava, Fakultě elektrotechniky a informatiky, Katedře telekomunikační techniky. Hlavní náplní praktického měření je ověření možností aplikování optického vláknového zesilovače (EDFA) do již zmíněné sítě. Toto měření by bylo těžce realizovatelné bez spolupráce se společnostmi VYDIS a.s., PROFiber Networking CZ s.r.o., které umožnily zápůjčku speciálních měřících přístrojů a se sdružením CESNET z. s. p.o, jenž poskytl zmíněný optický vláknový zesilovač (EDFA).

### 7.1 Popis experimentálního měření

Jednou z hlavních síťových komponent umístěných v laboratoři přístupových optických sítí, kde probíhalo praktické měření je v České republice unikátní WDM-PON platforma od společnosti LG-Ericsson EAST 1100 Release 3.

#### LG-Ericsson EAST 1100 Release 3

EAST 1100 (Ethernet Access Service Terminal) jedná se o ústřední modulární systém instalovaný do hlavních rozvodů (racků), který v topologiích WDM-PON reprezentuje OLT jednotku. Modularita zařízení poskytuje snadnou možnost rozšíření kapacity při minimálních nákladech. EAST 1100 je vhodný pro veškeré dnes populární služby, triple-play. Integrované prvky zahrnují 2x porty pro karty přivádějící konektivitu (NI), diagnostickou kartu dohledového systému (SW) a 8x porty pro karty obsluhy koncových zařízení (PI). Datová komunikace ke každému koncovému zařízení dosahuje teoreticky až 1 Gbit/s, záleží na typu PI karty. [23]



Obr. 7.1: OLT jednotka LG-Ericsson EAST 1100 Release 3.

V modulárním systému EAST 1100 byla použita karta LG-Ericsson 4\_PI (PON Interface) s obsluhou až 32 koncových uživatelů. Technické parametry PI karty jsou vyznačeny v Tab. č. 7.1.

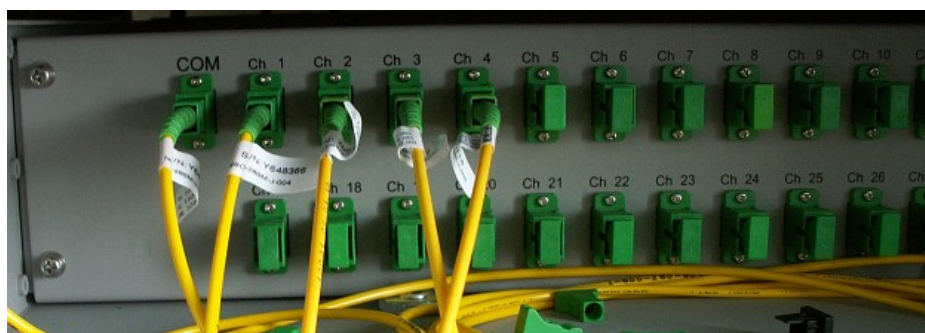
Parametr	Hodnota
Pásmo vlnových délek [nm]	1573 – 1600
Střední spouštěcí výkon [dBm]	19
Minimální senzitivita [dBm]	- 29
Kanálový rastr [GHz]	100
Přenosová vzdálenost [km]	20

Tab. 7.1: Technické specifikace PI karty.

Další důležitou součástí ve WDM-PON topologii je atermální AWG filtr (tj. teplotně nezávislý), který má označení LG-Ericsson WPF 1132c.

### LG-Ericsson WPF 1132c

WPF 1132c je určen pro multiplexování a demultiplexování optického signálu na trase mezi hlavní stanicí (OLT) a koncovým zákazníkem (ONU). Filtr je schopen odfiltrovat jednotlivé vlnové délky na přístupný výstup a vzájemně tyto linky od sebe izolovat. Zařízení je plně pasivní a nevyžaduje žádné dodatečné napájení. [23] V dokumentaci k této platformě výrobce uvádí vložený útlum o velikosti 5 dB.



Obr. 7.2: AWG filtr LG-Ericsson WPF 1132c.

Posledním nezbytným prvkem k provozu WDM-PON sítě je koncová jednotka na straně uživatele (ONU). Ve vybavení učebny jsou k dispozici jednotky od společnosti LG-Ericsson model EARU 1112.

### LG-Ericsson EARU 1112

Mezi přednost tohoto modelu patří jednoduchost a spolehlivost zařízení při velmi nízkém příkonu jednotky. Zařízení poskytuje podporu standardních datových služeb. [23] Technické parametry koncové jednotky udávané výrobcem jsou vyznačeny v Tab. č. 7.2.



Parametr	Hodnota
Pásmo vlnových délek [nm]	1533 – 1560
Střední spouštěcí výkon [dBm]	- 6
Minimální senzitivita [dBm]	- 36

Tab. 7.2: Technické specifikace koncové jednotky.

Dalším z významných prvků mého experimentálního pracoviště byl optický vláknový zesilovač EDFA od české společnosti Optokon typu CzechLight Amplifier PB01F.

### CLA-PB01F

CLA patří do rodiny nízko šumových výkonných zesilovačů navržených jako cenově efektivní řešení zesilovače optických sítí. CLA EDFA se skládá tzv. 2 v 1 modulů, jedná se o výkonový zesilovač a předzesilovač. Elektronické ovládání umožňuje samostatné nastavení v jednotlivých modulech zesílení i jiných parametrů dle potřeby přenosového systému. Jeho hlavní úlohou je zesílení velkého počtu kanálů s plochou charakteristikou zisku. Obsahuje tři řídicí módy:

- ACC (Automatic current control) – umožňuje automatickou regulaci proudu čerpacího zdroje.
- AGC (Automatic gain control) – umožňuje automatickou regulaci zisku.
- APC (Automatic power control) – umožňuje automatickou regulaci výkonu.



Obr. 7.3: EDFA zesilovač CLA-PB01F.

Technické parametry zesilovače udávané výrobcem jsou znázorněné v Tab. č. 7.3.

Parametr	Hodnota
Pásmo vlnových délek [nm]	1535 – 1565
Rozsah vstupního optického signálu [dBm]	- 5 až 5
Nominální zisk [dB]	20
Saturační výstupní výkon (pouze signál) [dBm]	20
Úroveň šumu [dBm]	6

Tab. 7.3: Technické specifikace CLA- PB01F.



Pro nastavení a ovládání zesilovače si můžeme vybrat ze dvou variant, buď nastavení pomocí konzole, nebo k zesilovači připojit obrazovku s klávesnicí. CLA je vybaven mikropočítačem, na kterém je nainstalován operační systém LINUX. Pro zadávání jednotlivých příkazů slouží speciální skript, jenž lze spustit pomocí příkazu `cla-admin`. Příkazy se poté zadávají pomocí speciální syntaxe, kdy důraz se klade pouze na jednu mezeru a každý příkaz musí být ukončen entrem. Lze jimi nastavovat jednotlivé parametry zařízení nebo parametry zjišťovat a to na obou modulech. Jelikož se v zařízení nachází dva moduly, musíme rozlišovat, kde jednotlivé příkazy zadáváme.

## 7.2 Použité měřicí přístroje

Pro účel měření praktické části práce byly vypůjčeny dvě speciální sady měřicích přístrojů. První sadu přístrojů zapůjčila společnost VYDIS a.s. a slouží ke kompletní analýze dvou limitujících parametrů optické přenosové trasy (útlumu a disperze). Jmenovitě dokáže přístroj zanalyzovat chromatickou disperzi (CD), polarizační módovou disperzi (PMD) a závislost útlumu na vlnové délce (AP), kdy základem měřicí sestavy je univerzální platforma JDSU MTS-6000A. Druhou výpůjčku poskytla společnost PROFiber Networking CZ s.r.o., a to jmenovitě optický spektrální analyzátor v univerzální platformě EXFO FTB-400 s modulem FTB-5240B a digitální útlumový článek EXFO FVA-60B.

### SADA PRO ANALÝZU PŘENOSOVÉ TRASY JDSU

Tato měřicí sada se skládá ze dvou přístrojů, jejichž základem je již zmíněná platforma JDSU MTS-6000A. V první platformě byl nainstalován modul širokopásmového zdroje (Optical Broadband Source). Parametry zdroje, které uvádí výrobce, jsou zaznamenány v Tab. č. 7.4.

Parametr	Hodnota
Pásmo vlnových délek [nm]	1260 – 1640
Min. spektrální hustota [dBm/nm]	- 42 / 0,1
Výstupní výkon [dBm]	> 8

Tab. 7.4: Technické specifikace širokopásmového zdroje.

Druhá platforma pak byla osazena modulem, jenž dokáže změřit chromatickou disperzi, polarizační módovou disperzi a závislost útlumu na vlnové délce. Technické parametry měřiče CD, PMD, AP udávané výrobcem jsou vyznačeny v Tab. č. 7.5.

Metoda měření chromatické disperze je následující. Do měřené optické trasy se generuje modulované světlo z širokopásmového zdroje, CD analyzátor pak porovná fázi testovaného signálu vůči referenčnímu signálu. Rozdíl fází signálu je změřen pro celkový rozsah vlnových délek. [24] Výhody nevýhody této metody jsou: [24]

Výhody:

- Vysoká přesnost měření
- Velký rozsah vlnových délek
- Možné testovat i přes jiné zařízení (zesilovač)

Nevýhody:

- Čas potřebný pro vykonání testu
- Vyžaduje dva měřicí přístroje
- Nutné znát délku trasy

	AP	PMD	CD
Parametr	Hodnota		
Dynamický rozsah [dB]	55	58	45
Doba měření [s]	6	16	40 až 80
Rozsah měřené PMD [ps]	-	0,08 až 130	-
Pásmo vlnových délek [nm]	-	-	1260 – 1640

Tab. 7.5: Technické specifikace měřiče CD, PMD, AP.

Základem metody měření polarizační módové disperze je měření optického výkonu procházejícího měřenou trasou v závislosti na vlnové délce. Nejprve se provede měření se zařazeným polarizátorem před detekční soustavou. Takto získáme spektrální závislost složky výkonu o určité polarizaci. Poté odstraníme polarizátor před přijímačem a změříme referenční hodnotu (spektrální závislost celkového výkonu). Z poměru obou naměřených spektrálních průběhů vyplývá spektrální závislost změny polarizace výstupního záření a z toho lze výpočtem stanovit hodnotu PMD dané optické trasy. Většinou se ke stanovení PMD používá rychlá Fourierova transformace, která umožňuje naměřené spektrální výsledky převést přímo do časové oblasti. [24] Výhody nevýhody této metody jsou: [24]

Výhody:

Nevýhody:

- Možné testovat i přes jiné zařízení (zesilovač)
- Citlivé na polarizaci vst. signálu
- Rychlost měření



Obr. 7.4: Platforma JDSU MTS-6000A a EXFO FTB-400.

### EXFO FTB-400

Jedná se o starší verzi multimodulární testovací platformy EXFO. Její hlavní výhodou je intuitivní ovládání, snadný management dat a snadný report výsledků do formátu pdf (Portable Document Format). V této platformě se nacházel modul FTB-5240B, který má funkci optického spektrálního analyzátoru. OSA umožňuje rychlou a přesnou diagnostiku CWDM/DWDM sítí,

jeho dynamický rozsah činí 90 dB. Dalším modul umístění v platformě FTB-400 byl FTB 7200D, který plní funkci optického reflektometru s dynamickým rozsahem až 34 dB.

### EXFO FVA-60B

Tento nástroj je vhodný pro testování nasazovaných přenosových systémů, neboť umožňuje přesné nastavení hodnoty útlumu a testovat tak funkci přenosového systému. Rozsah nastavitelných hodnot je 1,55 až 65 dB s rozlišením 0,05 dB. Přístroj umožňuje definovat útlum absolutně i relativně. Technické parametry proměnného útlumového článku udávané výrobcem jsou vyznačeny v Tab. č. 7.6. Použitý přístroj je vyobrazen na Obr. č. 7.5.

Parametr	Hodnota
Vložný útlum [dB]	2,5
Útlum odrazu [dB]	27
Max. vstupní výkon [dBm]	15

Tab. 7.6: Technické specifikace útlumového článku EXFO FVA-60B.



Obr. 7.5: EXFO FVA-60B.

### DALŠÍ POUŽITÉ PRVKY

Další použité prvky nezbytné při měření byly:

- Dva 3-portové cirkulátory model 6015-3-FC.
- Inspekční mikroskop NOYES pro kontrolu čistoty konektorů.
- Předřadné vlákno.
- Dělicí splitter (70:30).
- Patchcordy mezi různými konektory.
- Útlumové články 3, 5 a 10 dB.
- Různé druhy optických spojek.

### 7.3 Provedená měření

Všechna měření jsou provedena v rámci technických možností laboratorního vybavení a jejich cílem bylo ověřit možnost aplikování optického vláknového zesilovače (EDFA) do reálné WDM-PON sítě. Dále také porovnání dosažených výsledků se simulacemi. Pro porovnání výsledků se simulacemi lze sice použít jen výstupy z optického spektrálního analyzátoru, ale na základní popis a představu je to dostačující.

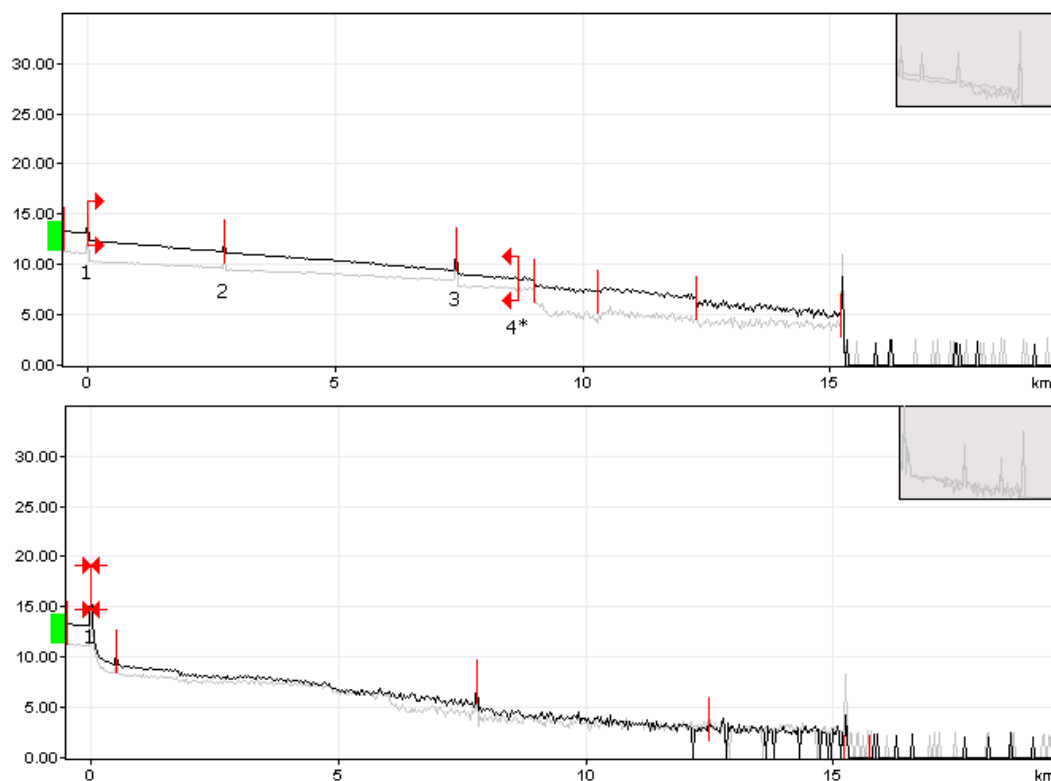
#### 7.3.1 Maximální dosah WDM-PON

Prvním úkolem experimentálního měření bylo, zjistit při jak dlouhé vzdálenosti optické trasy je WDM-PON platforma schopná ještě komunikovat s koncovými jednotkami. Jak již úvodní slova napovídají, pro zapojení měřicí sestavy tohoto úkolu bylo zapotřebí vytvořit dostatečně dlouhou optickou trasu. V technických možnostech katedry je použití deseti cívek s navinutým standardním jednovidovým vláknem, kdy parametr měrného útlumu na vlnové délce 1550 nm činí  $0,24 \text{ dB} \cdot \text{km}^{-1}$ . Pro spojení všech kotoučů byly zvoleny dvě metody. Metoda nerozebíratelného spoje pomocí optického sváru, kde se použila optická svářečka Fujikura FSM45, nebo metoda rozebíratelného spoje pomocí optických spojek (pigtailů). Ukázku sestavené trasy můžeme vidět na Obr. č. 7.6. Při výstavbě optických tras bývá zvykem tuto trasu vždy analyzovat nepřímou metodou (reflektometrem). Provedené náměry v obou směrech trasy jsou vyznačeny na Obr. č. 7.7.



Obr. 7.6: Ukázka optické trasy. Měření útlumu nepřímou metodou.

Z naměřených charakteristik reflektometru je patrné, že celková délka optické trasy činí 15,233 km. V celkové délce optické trasy se však nachází předřadné vlákno délky 500 m, jenž je nedílnou součástí postupu měření nepřímé metody. Po odečtení 500 m dostaneme tedy skutečnou vzdálenost 14,733 km. Z naměřených charakteristik lze také poznat, že trasa byla spojována již



Obr. 7.7: Charakteristika získaná z OTDR při analýze optické trasy.

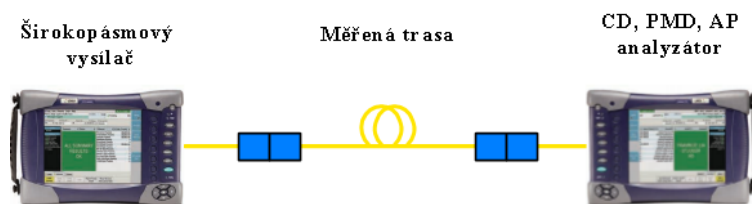
zmíněnými metodami. V trase se nacházejí poklesy napěťové úrovně, jenž je charakteristický rys optického sváru i jemné špičky napěťové úrovně, které reprezentují optické spojky.

Nyní již mohlo být provedeno první měření na WDM-PON síti, kde se sestavená optická trasa připojila mezi OLT jednotku a AWG filtr. Na OLT jednotce byl povolen pomocí konzolového připojení provoz na šesti koncových jednotkách. Při připojení optické trasy délky 14,733 km celá síť fungovala bez jakýchkoli problémů, všech šest koncových jednotek se naladilo na svoji pracovní vlnovou délku. Proto bylo nutné do trasy zapojit proměnný digitální útlumový článek, který pomocí nastavovaného útlumu simuloval prodlužující se optickou trasu. Výrazné změny ve WDM-PON síti nastaly při útlumu kolem 3 dB. Jestliže hodnota útlumu překročila 3 dB, čtvrtá koncová jednotka se již nenaladila na svoji pracovní vlnovou délku, tedy nebyl možný datový provoz s touto koncovou jednotkou. Z čehož vyplývá, že zjištěný maximální dosah WDM-PON sítě činí, délka optické trasy 14,733 km a hodnota útlumového článku 3 dB. Jelikož známe měrný útlum vlákna ( $0,24 \text{ dB} \cdot \text{km}^{-1}$  na vlnové délce 1550 nm) můžeme přepočítat dle známého vztahu hodnotu útlumu na odpovídající vzdálenost:

$$a = \frac{A}{L} [\text{dB} \cdot \text{km}^{-1}; \text{dB}; \text{km}] \rightarrow L = \frac{A}{a} = \frac{3}{0,24} = \mathbf{12,5 \text{ km.}} \quad (7.1)$$

Maximální dosah platformy LG-Ericsson EAST 1100 Relase 3 tedy činí 27,233 km.

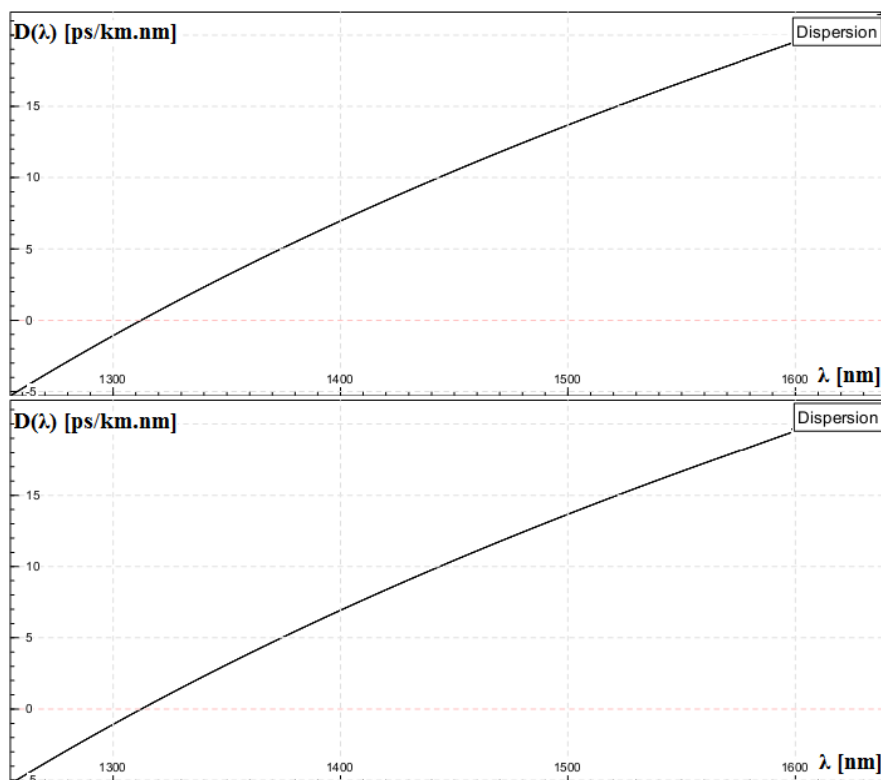
Po zjištění maximálního dosahu WDM-PON sítě jsem optickou trasu podrobil analýze pomocí již popsané měřicí sady na měření disperze a útlumu ve vlákne. Toto měření má charakter



Obr. 7.8: Blokové schéma při analýze přenosové trasy.

informativní, jelikož se nepředpokládá kvůli malé přenosové rychlosti a malé vzdálenosti trasy, že hodnoty změřených disperzí dosáhnou nějakých dramatických mezí. Na druhou stranu při měření je použita platforma, která využívá hustého vlnového multiplexu DWDM (1530 nm až 1600 nm). Tudíž je dobré mít představu, v jakých hodnotách se disperze a útlum pohybuje v celém užitečném spektru a nejen pro jednu konkrétní vlnovou délku. Při analýze disperze a útlumu si postup měření vyžaduje oboustranné měření. Blokové schéma sestavy můžeme vidět na Obr. č. 7.8.

Prvním výstupem, který měřič JDSU MTS-6000A nabídl je závislost koeficientu chromatické disperze na vlnové délce (viz. Obr. č. 7.9). Vliv chromatické disperze (CD) tkví v tom, že různé spektrální složky signálu (tzn. na odlišných vlnových délkách) se šíří optickým vláknem rozdílnou rychlostí. Impuls informačního toku, který nutně obsahuje více spektrálních složek, se bude průchodem vláknem časově roztahovat, jelikož se některé jeho spektrální složky budou zpožďovat oproti jiným. Popsaný jev má nesmírný vliv na přenosovou rychlost celého systému.

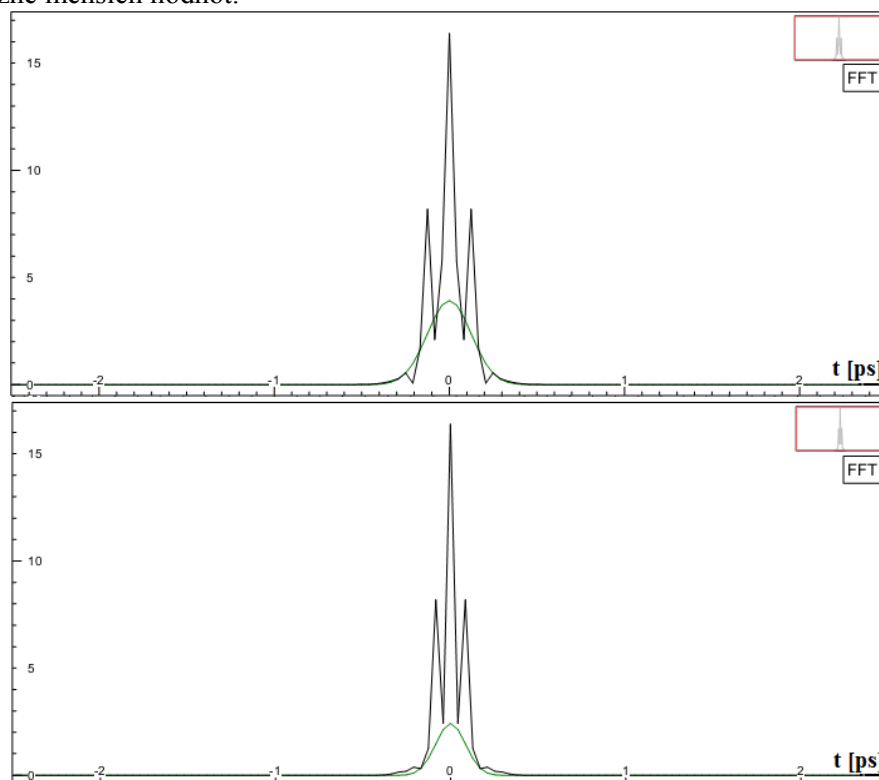


Obr. 7.9: Závislost koeficientu chromatické disperze na vlnové délce v obou směrech.



Nulová hodnota koeficientu chromatické disperze nastala v prvním směru při vlnové délce  $\lambda_0 = 1312,33 \text{ nm}$  a sklon disperzní charakteristiky v místě nulové chromatické disperze činil  $S_0 = 0,087 \text{ ps/nm}^2 \cdot \text{km}$ . V opačném směru se hodnoty pohybovaly  $\lambda_0 = 1312,40 \text{ nm}$  a  $S_0 = 0,086 \text{ ps/nm}^2 \cdot \text{km}$ .

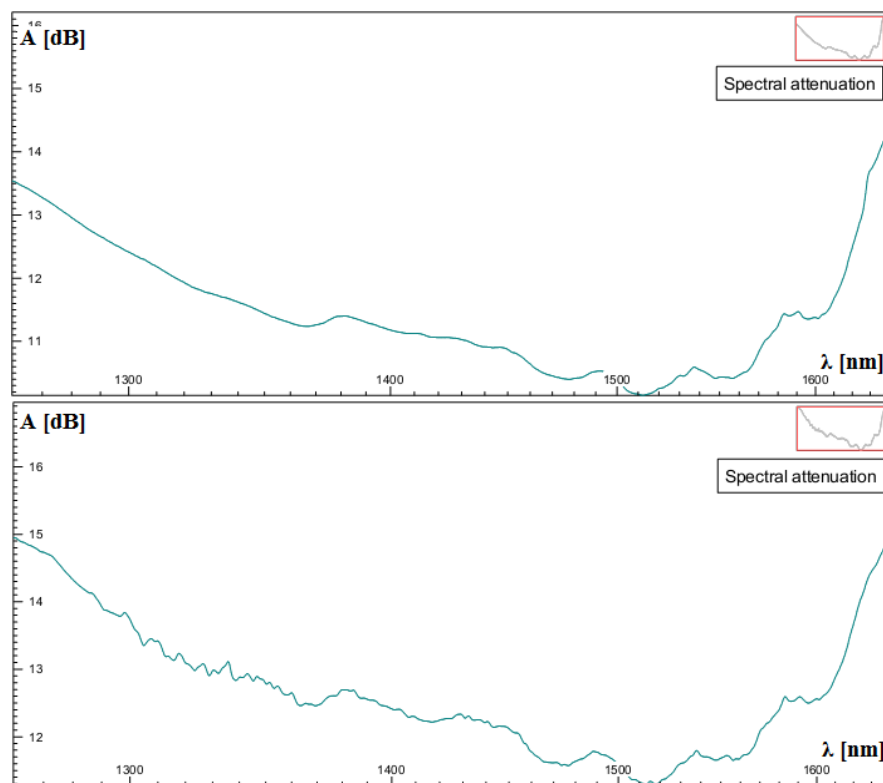
Druhou charakteristikou získanou při analýze disperze optické přenosové trasy je rychlá Fourierova transformace, která se využívá při zjišťování polarizační módové disperze (PMD) (viz. Obr. č. 7.10). Původ PMD spočívá v tom, že optické vlákno není ideálně kruhové a homogenní. Říkáme, že ve vláknu je přítomen tzv. dvojlom. Navážeme-li do jednovidového vlákna záření, šíří se v něm ve dvou navzájem kolmých rovinách tzv. polarizačních videch. Vlivem dvojlomu se ovšem záření šíří v obou těchto videch různě rychle. V důsledku toho dochází na konci trasy mezi oběma polarizačními vidy k časovému zpoždění, a jelikož impuls nesoucí informaci je tvořen oběma vidy, dochází k jeho roztahování. Ve srovnání s CD nabývá PMD výrazně menších hodnot.



Obr. 7.10: Rychlá Fourierova transformace potřebná k výpočtu PMD v obou směrech.

Změřené hodnoty koeficientu polarizační módové disperze se pohybovaly v prvním směru  $D_{PMD} = 0,035 \text{ ps}/\sqrt{\text{km}}$  a v druhém směru  $D_{PMD} = 0,029 \text{ ps}/\sqrt{\text{km}}$ .

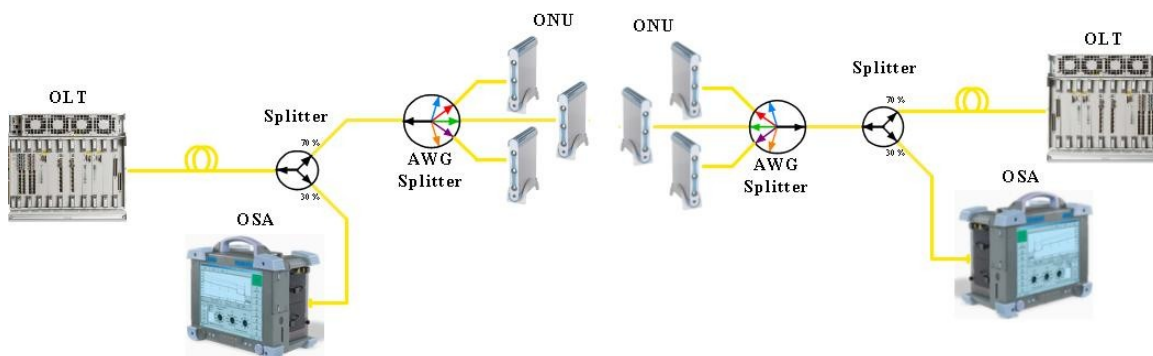
Poslední získaná charakteristika vychází z měření útlumu a vyznačuje velikost útlumu na odpovídajících vlnových délkách (viz. Obr. č. 7.11). Tyto charakteristiky nám udávají představu o tom, jak velký útlum optická trasa má na jednotlivých vlnových délkách.



Obr. 7.11: Závislost útlumu optické trasy na jednotlivých vlnových délkách v obou směrech.

Hodnota měrného útlumu se pro první směr pohybovala v mezích  $\alpha = 0,680$  až  $0,690 \text{ dB} \cdot \text{km}^{-1}$ . V druhém směru to bylo v rozsahu  $\alpha = 0,764$  až  $0,769 \text{ dB} \cdot \text{km}^{-1}$ .

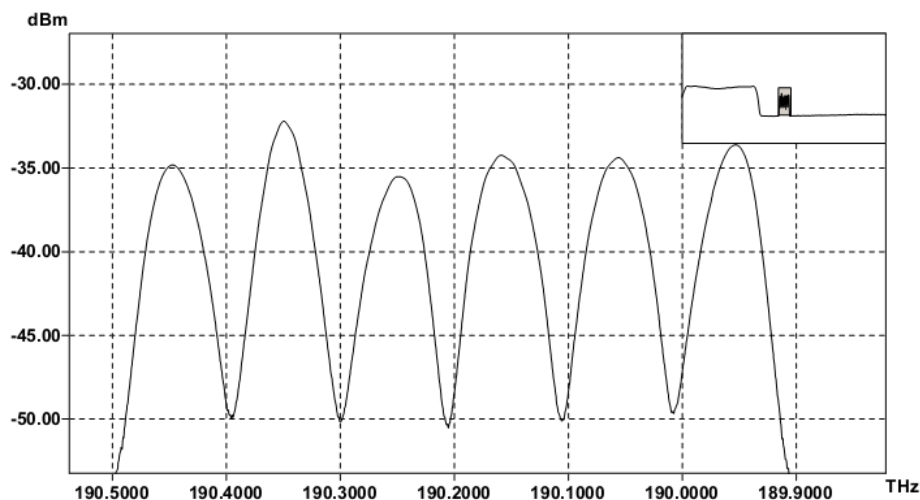
Poslední parametr, který zbývá vyhodnotit pro maximální dosah WDM-PON sítě je optické spektrum v obou směrech (C a L pásmo). Při samotném měření bylo nutné mezi OLT jednotku a AWG filtr připojit dělič 1:2 s dělicím poměrem 70:30, který vydělil optický signál do větví s definovaným poměrem. Kdy 70% větev byla využita pro komunikaci WDM-PON sítě a nalezení ONU jednotek a 30 % větev byla připojena na optický spektrální analyzátor. Blokové schéma měřicí sestavy pro měření v obou směrech je možné vidět na Obr. č. 7.12.



Obr. 7.12: Blokové schéma měření optického spektra ve směru downstream i upstream.



Po správném nastavení všech parametrů (optického rastru, mezních hodnot výkonových úrovní a odstupu signál šum) je možné spustit měřicí test, jehož výsledek je po dokončení testu k dispozici na displeji OSA i s přehlednou tabulkou naměřených hodnot.



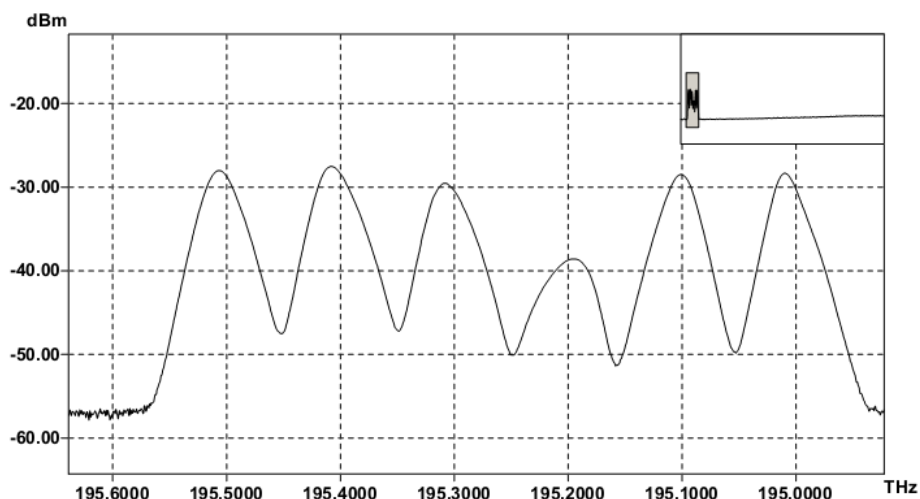
Obr. 7.13: Optické spektrum pro maximální dosah WDM-PON ve směru downstream.

Špička	Kanál	f [THz]	P [dBm]	SNR [dB]	Šum [dBm]	BW v 3 dB [THz]
1	CHL_1	190,4460	-25,48	21,47	-51,18	0,0389
2	CHL_2	190,3487	-23,68	22,16	-50,05	0,0307
3	CHL_3	190,2500	-26,19	19,94	-50,34	0,0400
4	CHL_4	190,1569	-24,55	21,58	-50,33	0,0434
5	CHL_5	190,0565	-24,91	20,75	-49,85	0,0412
6	CHL_6	189,9557	-24,37	24,64	-53,19	0,0370

Tab. 7.7: Parametry pro jednotlivé kanály ve směru downstream.

Na Obr. č. 7.13 můžeme vidět optické spektru pro maximální dosah WDM-PON sítě ve směru downstream (L pásmo). Z náměru jest patrný provoz na šesti koncových jednotkách, kdy parametry jednotlivých kanálů jsou vyznačeny v Tab. č. 7.7. Zde bych zvonu upozornil na fakt, že získané výsledky jsou ovlivněny dělicím poměrem 70:30, který bylo nutné při měření použít.

Optické spektrum opačného směru (upstreamu – C pásmo) pro maximální dosah WDM-PON sítě můžeme vidět na Obr. č. 7.14. Z naměřeného spektra je krásně patrný mezní stav čtvrté koncové jednotky, která se právě nejvíce podílela na určení maximálního dosahu WDM-PON platformy. Naměřené hodnoty parametrů jednotlivých kanálů jsou vyznačeny v Tab. č. 7.8. Opět upozorňuji na fakt, že získané výsledky jsou ovlivněny dělicím poměrem 70:30, který bylo nutné při měření použít.



Obr. 7.14: Optické spektrum pro maximální dosah WDM-PON ve směru upstream.

Špička	Kanál	f [THz]	P [dBm]	SNR [dB]	Šum [dBm]	BW v 3 dB [THz]
1	CHC_1	195,5057	-19,40	27,34	-51,42	0,0280
2	CHC_2	195,4058	-18,81	23,91	-47,39	0,0293
3	CHC_3	195,3061	-20,83	22,68	-48,17	0,0299
4	CHC_4	195,1995	-29,07	17,06	-50,79	0,0419
5	CHC_5	195,1017	-20,29	25,53	-50,46	0,0257
6	CHC_6	195,0081	-20,42	23,61	-48,68	0,0235

Tab. 7.8: Parametry pro jednotlivé kanály ve směru upstream.

### 7.3.2 Aplikování optického vláknového zesilovače

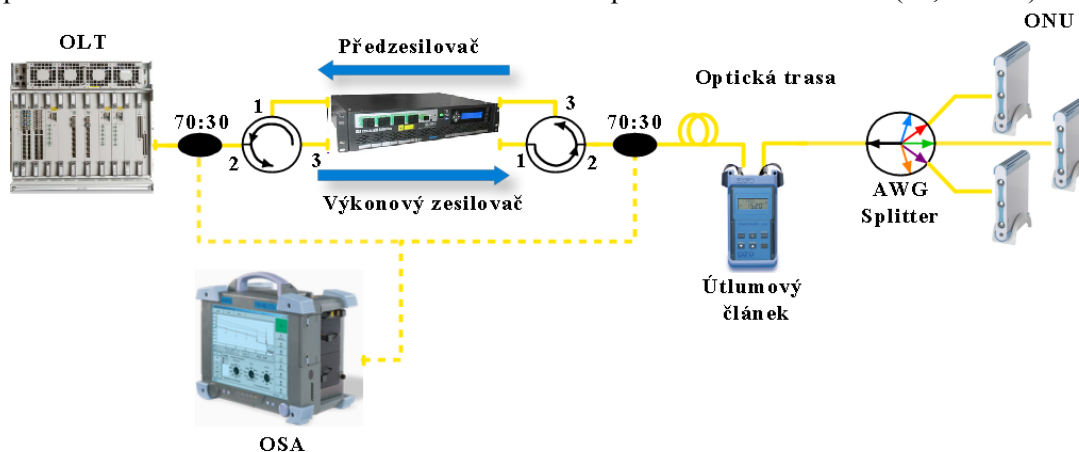
Druhým a také hlavním úkolem experimentálního měření bylo ověřit možnost aplikování optického vláknového zesilovače do reálné WDM-PON sítě. Pro zesílení optického signálu jsme zvolili zesilovač EDFA typu CLA-PB01F, jehož podrobný popis se nachází v kapitole 7.1. Tento typ zesilovače je primárně určen pro práci ve vlnové oblasti C pásma, proto bude zajímavé sledovat jakých zisků (jestli vůbec) dosáhne v pásmu L. Při sestavování měřicí sestavy nastal problém v tom, že zesilovač CLA kvůli svému vnitřnímu zapojení (použité izolátory) nepodporuje obousměrný provoz, proto jsme byli nuceni před a za zesilovač umístit optický cirkulátor, který problém s obousměrným provozem vyřešil.

Kvůli celkovému porovnání dosažených výsledků se simulací v softwarovém prostředí Optiwave byl zesilovací prvek tak jako v rámci simulace umístěn na třech různých místech v optické přenosové trase. Na začátku trasy, kdy EDFA zesilovač měl ve směru downstream funkci výkonového zesilovače s nastavenou hodnotou zisku 10 dB a ve směru upstream funkci předzesilovače s hodnotou zisku 20 dB. Druhé umístění bylo v průběhu optické trasy, kdy v obou směrech měl EDFA zesilovač funkci průběžného zesilovače s nastavenou hodnotou zisku 20 dB. Poslední třetí umístění pak na konci trasy, kde ve směru downstream měl funkci předzesilovače

s hodnotou zisku 20 dB a v upstreamu funkci výkonového zesilovače s hodnotou zisku 10 dB. Pro každé ze tří umístění zesilovacího prvku byl změřen také maximální dosah této topologie, kde stejně jako v předchozím měření optickou trasu reprezentovala sestavená optická trasa s proměnným digitálním útlumovým článkem.

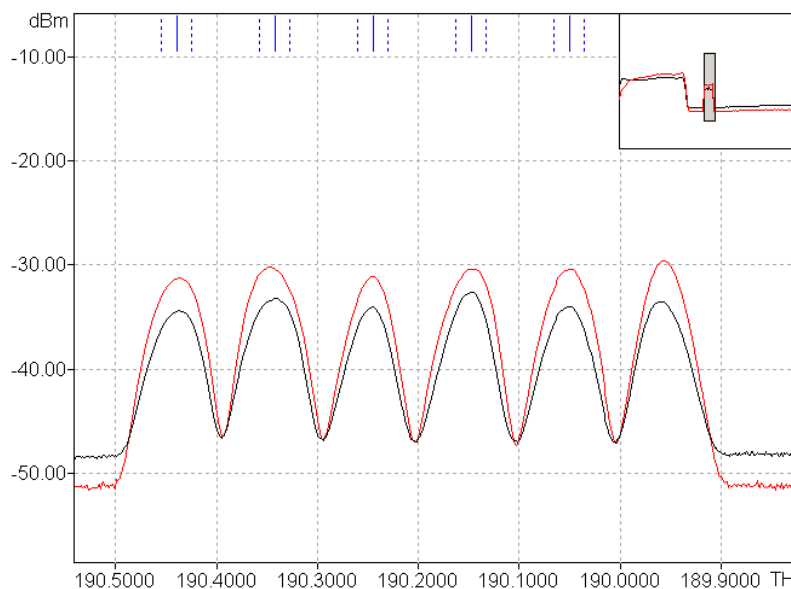
### PRVNÍ UMÍSTĚNÍ ZESILOVACÍHO PRVKU

Schéma sestavené topologie je vyznačeno na Obr. č. 7.15. Základní délka optické trasy odpovídá maximálnímu dosahu WDM-PON sítě bez aplikovaného zesilovače (27,233 km).



Obr. 7.15: Sestavená topologie pro první umístění zesilovače.

Po vložení a nastavení EDFA zesilovače CLA bylo změřeno optické spektrum v downstreamu (viz Obr. č. 7.16), kde černá křivka značí spektrum před zesilovačem a červená značí zesílený optický signál za zesilovačem. Těmto optickým signálům odpovídají parametry vyznačené v Tab. č. 7.9.



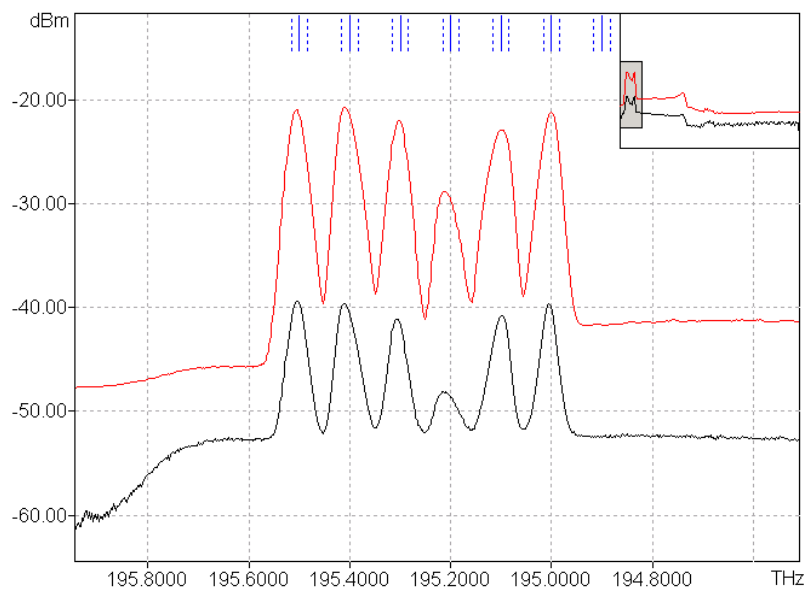
Obr. 7.16: Optické spektrum před a za zesilovačem ve směru downstream.

Špička	Kanál	f [THz]	P [dBm]	SNR [dB]	Šum [dBm]	BW v 3 dB [THz]
1	CHL_1	190,4387	-34,67	17,49	-46,83	0,0412
2	CHL_2	190,3433	-33,41	18,79	-46,73	0,0431
3	CHL_3	190,2470	-34,30	17,03	-46,89	0,0324
4	CHL_4	190,1496	-32,75	19,00	-47,11	0,0335
5	CHL_5	190,0517	-34,22	17,93	-47,12	0,0378
6	CHL_6	189,9572	-33,72	18,31	-47,07	0,0368

Špička	Kanál	f [THz]	P [dBm]	SNR [dB]	Šum [dBm]	BW v 3 dB [THz]
1	CHL_1	190,4384	-31,40	20,92	-46,90	0,0415
2	CHL_2	190,3452	-30,29	21,86	-46,69	0,0429
3	CHL_3	190,2461	-31,22	20,28	-47,05	0,0317
4	CHL_4	190,1484	-30,45	22,02	-47,25	0,0385
5	CHL_5	190,0506	-30,49	21,89	-47,28	0,0380
6	CHL_6	189,9552	-29,68	22,79	-47,91	0,0319

Tab. 7.9: Parametry pro jednotlivé kanály ve směru downstream před a za zesilovačem.

Optické spektrum v upstreamu (viz Obr. č. 7.17) dosahuje hodnot parametrů vyznačených v Tab. č. 7.10. Opět černá křivka značí spektrum před zesilovačem a červená značí zesílený optický signál za zesilovačem.



Obr. 7.17: Optické spektrum před a za zesilovačem ve směru upstream.

Špička	Kanál	f [THz]	P [dBm]	SNR [dB]	Šum [dBm]	BW v 3 dB [THz]
1	CHC_1	195,5041	-39,61	16,55	-52,38	0,0279
2	CHC_2	195,4072	-39,89	16,56	-52,10	0,0328
3	CHC_3	195,3051	-41,49	14,14	-51,93	0,0284
4	CHC_4	195,2054	-50,42	6,89	-52,04	0,0661
5	CHC_5	195,0992	-41,18	14,73	-51,88	0,0309
6	CHC_6	195,0036	-39,96	15,18	-52,01	0,0235

Špička	Kanál	f [THz]	P [dBm]	SNR [dB]	Šum [dBm]	BW v 3 dB [THz]
1	CHC_1	195,5052	-21,01	23,82	-40,99	0,0276
2	CHC_2	195,4066	-20,85	22,92	-39,37	0,0322
3	CHC_3	195,3025	-22,12	21,49	-39,82	0,0277
4	CHC_4	195,2073	-29,16	16,19	-40,48	0,0392
5	CHC_5	195,0996	-23,04	21,11	-39,25	0,0371
6	CHC_6	195,0005	-21,33	22,47	-39,92	0,0278

Tab. 7.10: Parametry pro jednotlivé kanály ve směru upstream před a za zesilovačem.

Pro jednotlivé směry se skutečný zisk zesilovače odečtený z naměřených optických spekter pohyboval v každém kanále viz. Tab. č. 7.11 (na zesilovači nastaven zisk downstream 10dB, upstream 20 dB ).

Kanál č.	1	2	3	4	5	6
Zisk v downstreamu [dB]	3,3	3,1	3,1	2,3	3,7	4,0
Zisk v upstreamu [dB]	18,6	19,1	19,4	21,2	18,2	18,7

Tab. 7.11: Skutečný zisk zesilovače v každém kanálu.

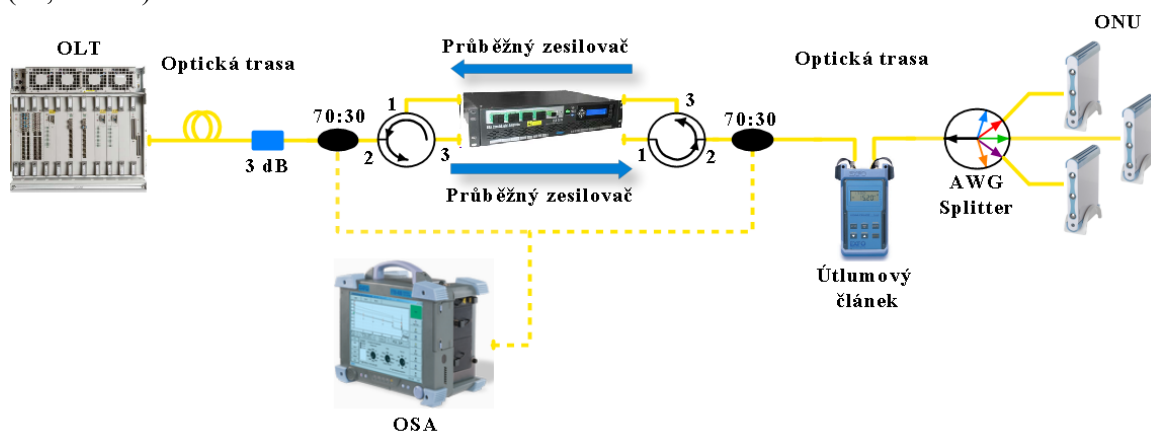
Při připojení optické trasy délky 27,233 km celá síť fungovala bez jakýchkoli problémů, všech šest koncových jednotek se naladilo na svoji pracovní vlnovou délku. Proto bylo nutné do trasy zapojit proměnný digitální útlumový článek, který pomocí nastavovaného útlumu simuloval prodlužující se optickou trasu. Výrazné změny ve WDM-PON síti nastaly při útlumu kolem 8 dB. Jestliže hodnota útlumu překročila 8 dB, čtvrtá koncová jednotka se již nenaladila na svoji pracovní vlnovou délku, tedy nebyl možný datový provoz s touto koncovou jednotkou. Z čehož vyplývá, že zjištěný maximální dosah WDM-PON topologie s prvním umístěním zesilovacího prvku činí, délka optické trasy 27,233 km a hodnota útlumového článku 8 dB. Jelikož známe měrný útlum vlákna ( $0,24 \text{ dB} \cdot \text{km}^{-1}$  na vlnové délce 1550 nm) můžeme přepočítat dle známého vztahu hodnotu útlumu na odpovídající vzdálenost:

$$a = \frac{A}{L} [\text{dB} \cdot \text{km}^{-1}; \text{dB}; \text{km}] \rightarrow L = \frac{A}{a} = \frac{8}{0,24} = \mathbf{33,333 \text{ km}}. \quad (7.2)$$

Maximální dosah platformy WDM-PON sítě s prvním umístěním zesilovacího prvku tedy činí 60,566 km.

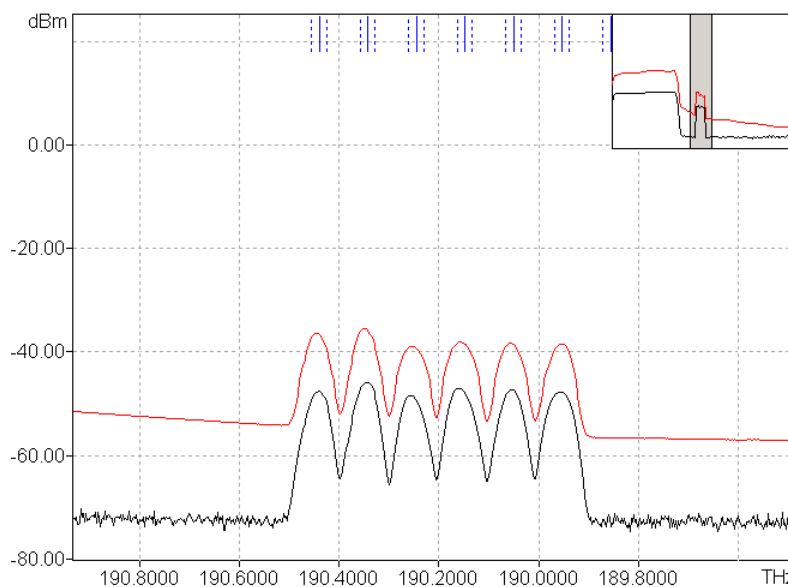
### DRUHÉ UMÍSTĚNÍ ZESILOVACÍHO PRVKU

Schéma sestavené topologie je vyznačeno na Obr. č. 7.18. Základní délka optické trasy před zesilovačem odpovídá maximálnímu dosahu WDM-PON sítě bez aplikovaného zesilovače (27,233 km).



Obr. 7.18: Sestavená topologie pro druhé umístění zesilovače.

Po vložení a nastavení EDFA zesilovače CLA bylo změřeno optické spektrum v downstreamu (viz Obr. č. 7.19), kde černá křivka značí spektrum před zesilovačem a červená značí zesílený optický signál za zesilovačem. Těmto optickým signálům odpovídají parametry vyznačené v Tab. č. 7.12.



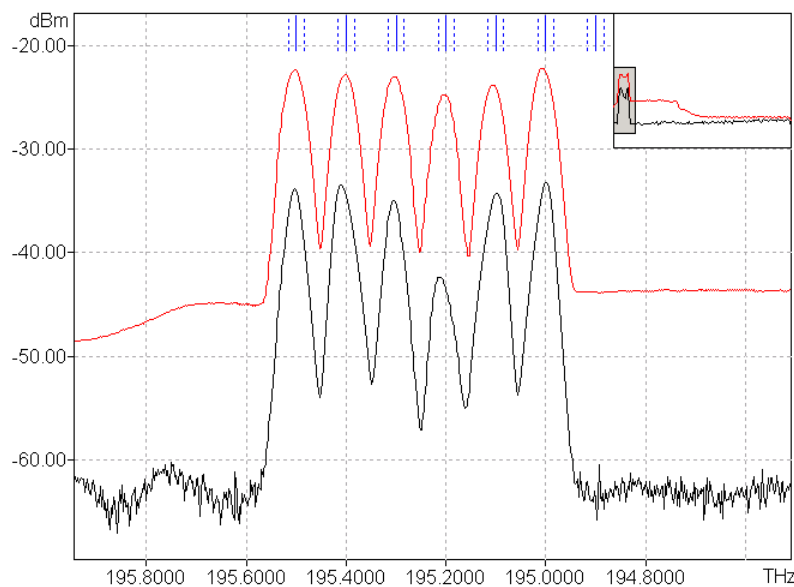
Obr. 7.19: Optické spektrum před a za zesilovačem ve směru downstream.

Špička	Kanál	f [THz]	P [dBm]	SNR [dB]	Šum [dBm]	BW v 3 dB [THz]
1	CHL_1	190,4399	-47,73	22,35	-65,30	0,0343
2	CHL_2	190,3436	-45,87	24,08	-65,29	0,0333
3	CHL_3	190,2522	-48,45	21,91	-65,46	0,0359
4	CHL_4	190,1555	-47,10	23,26	-65,11	0,0385
5	CHL_5	190,0528	-47,31	22,50	-65,09	0,0339
6	CHL_6	189,9557	-47,82	26,14	-68,31	0,0431

Špička	Kanál	f [THz]	P [dBm]	SNR [dB]	Šum [dBm]	BW v 3 dB [THz]
1	CHL_1	190,4428	-36,43	20,92	-52,56	0,0343
2	CHL_2	190,3467	-35,56	21,45	-52,23	0,0343
3	CHL_3	190,2503	-39,23	19,08	-52,63	0,0453
4	CHL_4	190,1536	-38,24	20,65	-53,12	0,0459
5	CHL_5	190,0541	-38,43	20,18	-53,42	0,0390
6	CHL_6	189,9541	-38,52	21,16	-54,47	0,0385

Tab. 7.12: Parametry pro jednotlivé kanály ve směru downstream před a za zesilovačem.

Optické spektrum v upstreamu (viz Obr. č. 7.20) dosahuje hodnot parametrů vyznačených v Tab. č. 7.13. Opět černá křivka značí spektrum před zesilovačem a červená značí zesílený optický signál za zesilovačem.



Obr. 7.20: Optické spektrum před a za zesilovačem ve směru upstream.

Špička	Kanál	f [THz]	P [dBm]	SNR [dB]	Šum [dBm]	BW v 3 dB [THz]
1	CHC_1	195,5033	-33,85	25,04	-55,35	0,0252
2	CHC_2	195,4068	-33,55	24,33	-53,66	0,0306
3	CHC_3	195,3040	-35,00	26,06	-57,40	0,0261
4	CHC_4	195,2081	-42,53	18,37	-56,42	0,0345
5	CHC_5	195,0985	-34,34	24,20	-54,38	0,0299
6	CHC_6	194,9993	-33,25	29,76	-59,47	0,0249

Špička	Kanál	f [THz]	P [dBm]	SNR [dB]	Šum [dBm]	BW v 3 dB [THz]
1	CHC_1	195,5032	-22,42	22,95	-40,48	0,0378
2	CHC_2	195,4019	-22,90	21,71	-39,68	0,0383
3	CHC_3	195,3032	-23,07	21,69	-39,82	0,0387
4	CHC_4	195,2028	-24,89	20,35	-40,33	0,0381
5	CHC_5	195,1040	-23,89	21,04	-40,13	0,0369
6	CHC_6	195,0041	-22,25	22,41	-39,81	0,0372

Tab. 7.13: Parametry pro jednotlivé kanály ve směru upstream před a za zesilovačem.

Pro jednotlivé směry se skutečný zisk zesilovače odečtený z naměřených optických spekter pohyboval v každém kanále viz. Tab. č. 7.14 (na zesilovači nastaven zisk v obou směrech 20 dB).

Kanál č.	1	2	3	4	5	6
Zisk v downstreamu [dB]	11,3	10,3	9,2	8,9	8,9	9,3
Zisk v upstreamu [dB]	11,4	10,7	12,0	17,6	10,5	11,0

Tab. 7.14: Skutečný zisk zesilovače v každém kanálu.

Při připojení optické trasy délky 27,233 km celá síť fungovala bez jakýchkoli problémů, všech šest koncových jednotek se naladilo na svoji pracovní vlnovou délku. Proto bylo nutné do trasy zapojit proměnný digitální útlumový článek, který pomocí nastavovaného útlumu simuloval prodlužující se optickou trasu. Výrazné změny ve WDM-PON síti nastaly při útlumu kolem 3 dB. Jestliže hodnota útlumu překročila 3 dB, čtvrtá koncová jednotka se již nenaladila na svoji pracovní vlnovou délku, tedy nebyl možný datový provoz s touto koncovou jednotkou. Z čehož vyplývá, že zjištěný maximální dosah WDM-PON topologie s druhým umístěním zesilovacího prvku činí, délka optické trasy 27,233 km a hodnota útlumového článku 3 dB. Jelikož známe měrný útlum vlákna ( $0,24 \text{ dB} \cdot \text{km}^{-1}$  na vlnové délce 1550 nm) můžeme přepočítat dle známého vztahu hodnotu útlumu na odpovídající vzdálenost:

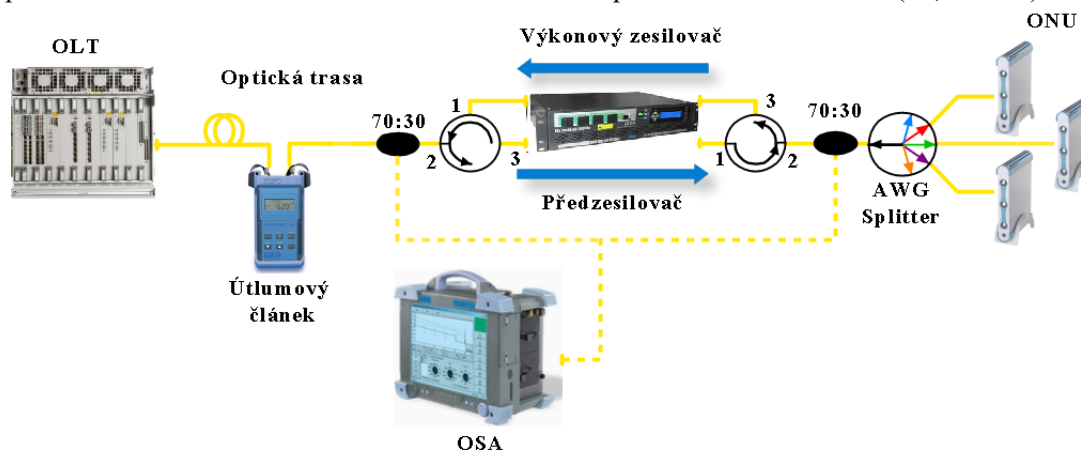
$$a = \frac{A}{L} [\text{dB} \cdot \text{km}^{-1}; \text{dB}; \text{km}] \rightarrow L = \frac{A}{a} = \frac{3}{0,24} = \mathbf{12,5 \text{ km.}} \quad (7.3)$$



Maximální dosah platformy WDM-PON sítě s druhým umístěním zesilovacího prvku tedy činí 39,733 km.

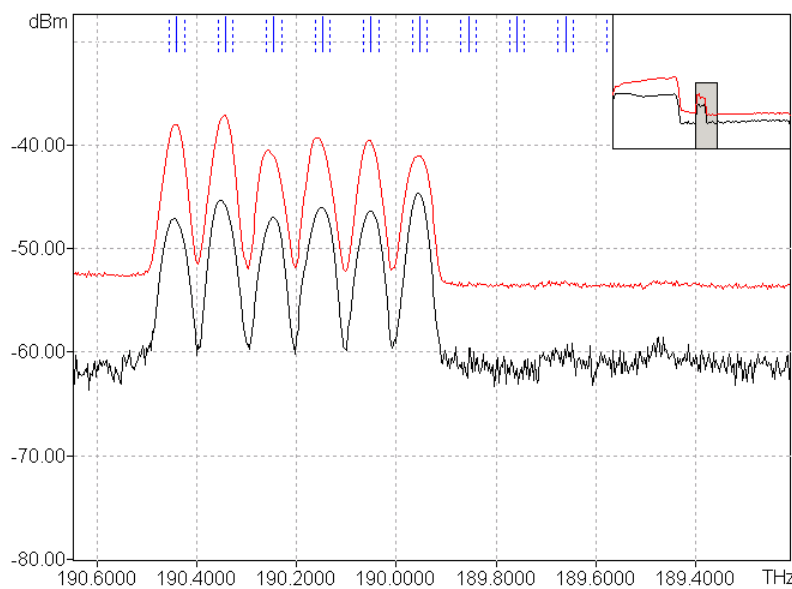
### TŘETÍ UMÍSTĚNÍ ZESILOVACÍHO PRVKU

Schéma sestavené topologie je vyznačeno na Obr. č. 7.21. Základní délka optické trasy odpovídá maximálnímu dosahu WDM-PON sítě bez aplikovaného zesilovače (27,233 km).



Obr. 7.21: Sestavená topologie pro třetí umístění zesilovače.

Po vložení a nastavení EDFA zesilovače CLA bylo změřeno optické spektrum v downstream (viz Obr. č. 7.22), kde černá křivka značí spektrum před zesilovačem a červená značí zesílený optický signál za zesilovačem. Těmto optickým signálům odpovídají parametry vyznačené v Tab. č. 7.15.



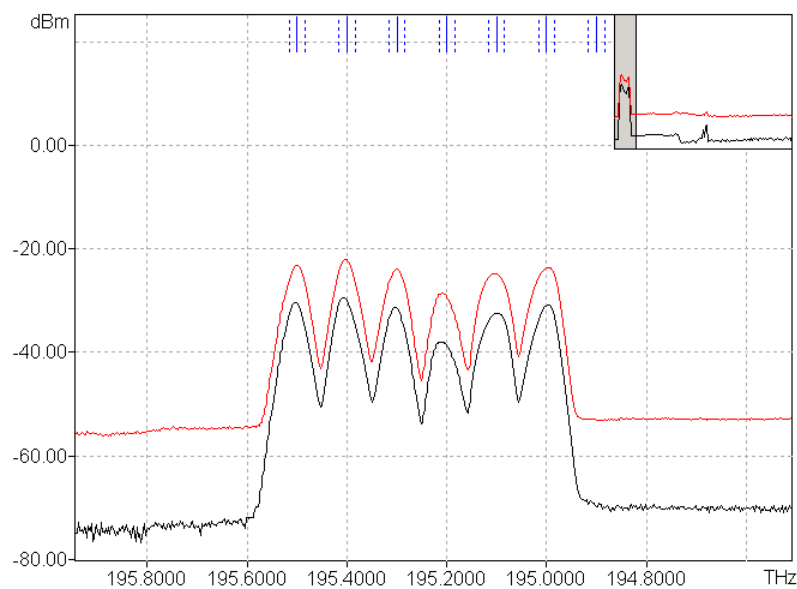
Obr. 7.22: Optické spektrum před a za zesilovačem ve směru downstream.

Špička	Kanál	f [THz]	P [dBm]	SNR [dB]	Šum [dBm]	BW v 3 dB [THz]
1	CHL_1	190,4428	-47,35	18,09	-60,07	0,0428
2	CHL_2	190,3475	-45,50	19,80	-60,05	0,0400
3	CHL_3	190,2471	-47,22	17,90	-60,26	0,0369
4	CHL_4	190,1507	-46,17	19,62	-60,32	0,0430
5	CHL_5	190,0523	-46,57	18,95	-60,27	0,0395
6	CHL_6	189,9559	-44,79	20,39	-60,59	0,0328

Špička	Kanál	f [THz]	P [dBm]	SNR [dB]	Šum [dBm]	BW v 3 dB [THz]
1	CHL_1	190,4413	-38,19	18,13	-51,74	0,0333
2	CHL_2	190,3442	-37,24	19,18	-51,83	0,0333
3	CHL_3	190,2523	-40,81	16,38	-52,03	0,0403
4	CHL_4	190,1561	-39,51	17,85	-52,18	0,0388
5	CHL_5	190,0541	-39,76	17,24	-52,25	0,0351
6	CHL_6	189,9561	-42,33	16,89	-52,61	0,0447

Tab. 7.15: Parametry pro jednotlivé kanály ve směru downstream před a za zesilovačem.

Optické spektrum v upstreamu (viz Obr. č. 7.23) dosahuje hodnot parametrů vyznačených v Tab. č. 7.16. Opět černá křivka značí spektrum před zesilovačem a červená značí zesílený optický signál za zesilovačem.



Obr. 7.23: Optické spektrum před a za zesilovačem ve směru upstream.

Špička	Kanál	f [THz]	P [dBm]	SNR [dB]	Šum [dBm]	BW v 3 dB [THz]
1	CHC_1	195,5030	-30,36	25,43	-52,07	0,0264
2	CHC_2	195,4052	-29,47	24,89	-50,37	0,0285
3	CHC_3	195,3026	-31,34	26,68	-54,14	0,0280
4	CHC_4	195,2069	-38,08	19,78	-52,93	0,0390
5	CHC_5	195,1000	-32,53	23,25	-50,47	0,0420
6	CHC_6	194,9983	-30,83	31,53	-57,98	0,0315

Špička	Kanál	f [THz]	P [dBm]	SNR [dB]	Šum [dBm]	BW v 3 dB [THz]
1	CHC_1	195,5008	-23,22	24,12	-43,41	0,0283
2	CHC_2	195,4026	-22,16	24,48	-42,64	0,0291
3	CHC_3	195,3006	-24,03	25,73	-45,60	0,0305
4	CHC_4	195,2062	-28,73	20,54	-44,62	0,0356
5	CHC_5	195,1026	-24,98	22,66	-42,09	0,0455
6	CHC_6	194,9991	-23,62	28,79	-47,33	0,0388

Tab. 7.16: Parametry pro jednotlivé kanály ve směru upstream před a za zesilovačem.

Pro jednotlivé směry se skutečný zisk zesilovače odečtený z naměřených optických spekter pohyboval v každém kanále viz. Tab. č. 7.17 (na zesilovači nastaven zisk downstream 20dB, upstream 10 dB).

Kanál č.	1	2	3	4	5	6
Zisk v downstreamu [dB]	9,1	8,2	6,4	5,1	6,8	3,5
Zisk v upstreamu [dB]	7,1	7,3	7,3	9,3	7,6	7,2

Tab. 7.17: Skutečný zisk zesilovače v každém kanálu.

Při připojení optické trasy délky 27,233 km celá síť fungovala bez jakýchkoli problémů, všech šest koncových jednotek se naladilo na svoji pracovní vlnovou délku. Proto bylo nutné do trasy zapojit proměnný digitální útlumový článek, který pomocí nastavovaného útlumu simuloval prodlužující se optickou trasu. Výrazné změny ve WDM-PON síti nastaly při útlumu kolem 13 dB. Jestliže hodnota útlumu překročila 13 dB, čtvrtá koncová jednotka se již nenaladila na svoji pracovní vlnovou délku, tedy nebyl možný datový provoz s touto koncovou jednotkou. Z čehož vyplývá, že zjištěný maximální dosah WDM-PON topologie s třetím umístěním zesilovacího prvku činí, délka optické trasy 27,233 km a hodnota útlumového článku 13 dB. Jelikož známe měrný útlum vlákna ( $0,24 \text{ dB} \cdot \text{km}^{-1}$  na vlnové délce 1550 nm) můžeme přepočítat dle známého vztahu hodnotu útlumu na odpovídající vzdálenost:

$$a = \frac{A}{L} [\text{dB} \cdot \text{km}^{-1}; \text{dB}; \text{km}] \rightarrow L = \frac{A}{a} = \frac{13}{0,24} = \mathbf{54,167 \text{ km.}} \quad (7.4)$$

Maximální dosah platformy WDM-PON sítě s třetím umístěním zesilovacího prvku tedy činí 81,4 km.

### 7.4 Srovnání dosažených výsledků se simulací

Jedním z hlavních bodů této diplomové práce bylo také porovnání dosažených výsledků praktického měření optické přístupové sítě WDM-PON s výsledky dosaženými v simulačním prostředí Optiwave Optisystem a to nejen ze strany konkrétních zjištěných hodnot, ale také z hlediska celkového nadhledu na problematiku. Od počátku návrhu simulace bylo přihlíženo na technické vybavení učetby přístupových optických sítí, kde se posléze uskutečnilo praktické měření. Navržená topologie v simulačním prostředí tedy obsahovala 6 koncových jednotek v plně duplexním provozu.

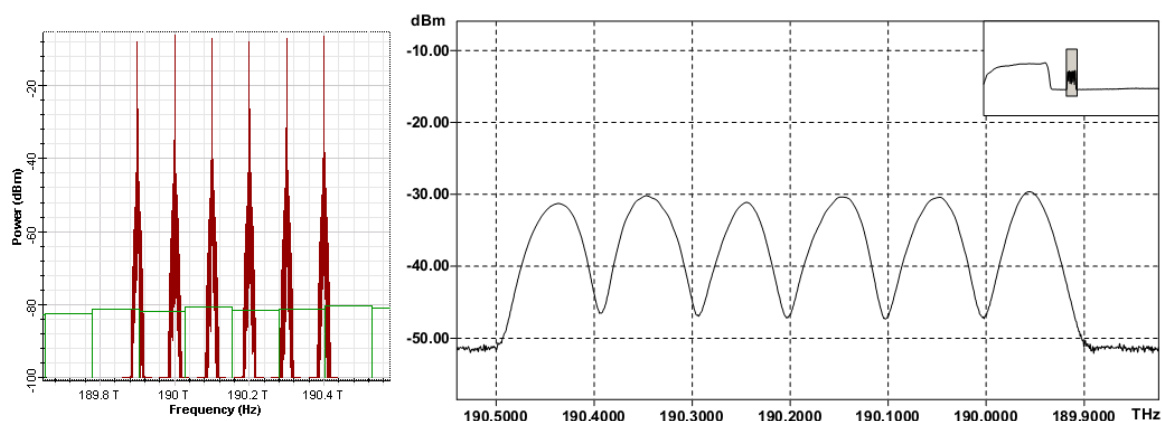
Úspěšný návrh síťové topologie v softwarovém prostředí Optiwave Optisystem 10.0 si žádá dobrou znalost nejen samotného programu, ale také celkové problematiky návrhu optických sítí. Pro získání výsledku, které by se aspoň z části podobaly reálným hodnotám získaným při praktickém měření, je nutno nastavení jednotlivých síťových komponent a jeho vzájemného propojení. Ve velmi hojné míře se musí při simulaci použít prvky, které se v reálné síti nevyskytují, ale pro bezchybný provoz simulace jsou potřebné (např. optický zpožďovací člen ve směru upstream). I když si prostudujeme a nastavíme všechny potřebné parametry navrhované sítě, musíme počítat s faktem, že simulace do jisté míry vždy bude idealizovaná, jelikož nikdy nedosáhneme zahrnutí všech potřebných parametrů vyskytujících se v reálné síti (např. vložné útlumy spojek, konektorů, patchbordů, nelineární jevy atd.).

I praktické měření na reálné síti sebou nese spoustu úskalí. Jako jedna z hlavních se jeví nastavení a manipulace s měřicími přístroji, jejichž obsluha nemusí být tak snadná jak se může na první pohled zdát (dlouhá doba zaškolení). Také se při připojení měřicího přístroje do reálné sítě může stát, že jeho konektor není kompatibilní s konektory vyskytující se v síti. Proto je vhodné si před samotným měřením zajisti redukční kabely a odpovídající optické spojky. Samozřejmě při připojování jakéhokoli optického kabelu do reálné sítě nesmíme zapomenout na kontrolu a čištění ferulí konektorů, lze tím ušetřit čas řešením následných problémů, proč síť nefunguje.

Porovnání dosažených výsledků lze provést pouze vzhledem k přístrojům, které byly použity, jak v simulaci, tak i v praktickém měření. Jde tedy pouze o optický spektrální analyzátor. V rámci simulace bylo použito hned několik spektrálních analyzátorů na různých místech sítě, v praktickém měření byl OSA umístován pouze v části optické distribuční sítě (ODN) před a za zesilovačem v obou směrech provozu. Porovnávat se tedy budou optické spektra za zesilovacím prvkem, které nabývají zajímavých tvarů.

#### POROVNÁNÍ VÝSLEDKŮ PRO PRVNÍ UMÍSTĚNÍ ZESILOVACÍHO PRVKU

Na Obr. č. 7.24 můžeme vidět optické spektrum získané při simulaci a při praktickém měření ve směru downstream. Z tohoto obrázku je na první pohled viditelný rozdíl v šířce spektrální čáry pro jednotlivé kanály. Tento rozdíl odpovídá odlišným laserům použitým ve vysílacích částech. Zatím co v simulaci byl použit laser s úzkou spektrální čarou (odpovídá DFB

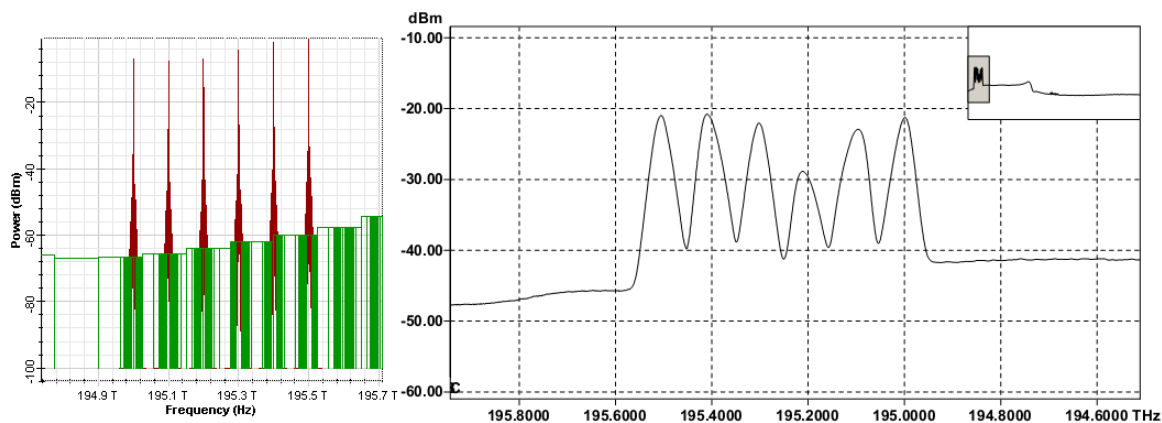


Obr. 7.24: Porovnání optického spektra simulace/praktické měření ve směru downstream.

laseru), reálná síť WDM-PON platformy LG-Ericsson EAST 1100 Release 3 používá FP lasery, které nabývají větších šířek spektrální čáry než zmíněné DFB lasery.

Dalším z viditelných nerovností je výkonová nerovnost v jednotlivých kanálech, která mohla být způsobena dvěma faktory. Buď vlastností FP laseru, kdy FP laser na základě stimulačního impulsu se naladí na odpovídající vlnovou délku, ale s různou výkonovou úrovní, nebo vlastností zesilovače, který nenabývá konstantního zisku na celém optickém spektru.

V charakteristikách si můžeme všimnout také velké nerovnosti mezi výkonovými úrovněmi v simulaci a praktického měření. Část této nerovnosti můžeme určitě přisoudit faktu, že v praktickém měření byl použit dělicí prvek 1:2 (70:30), který při sestavování topologie nelze vyloučit. Avšak nepatrnou část nerovnosti můžeme přisoudit také simulaci a jejím nastaveným parametrům, hlavně pak vysílacímu výkonu OLT jednotky, kdy výrobce LG-Ericsson ve svém manuálu neuvádí přesnou hodnotu výkonu pro jeden kanál (museli jsme tuto hodnotu dopočítat).



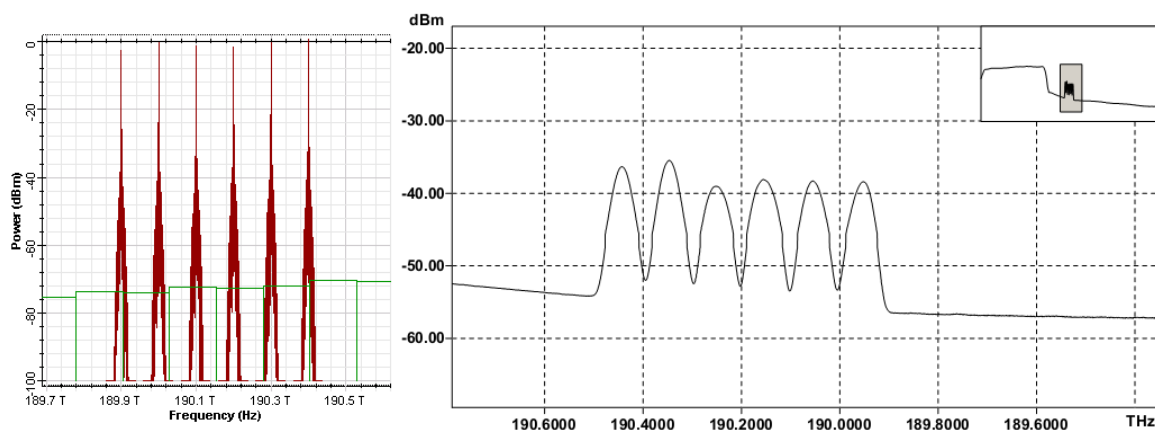
Obr. 7.25: Porovnání optického spektra simulace/praktické měření ve směru upstream.

Na Obr. č. 7.25 můžeme vidět optické spektrum získané při simulaci a při praktickém měření ve směru upstream. V obou případech optického spektra (simulace/praktické měření) se uplatňují stejné vlivy, které byly popsány pro směr downstream. Navíc se zde objevuje větší výkonová nerovnost čtvrté špičky (odpovídá čtvrté koncové jednotce) oproti ostatním. Což je způsobeno simulovaným maximálním dosahem WDM-PON sítě, kdy na něj měla vliv právě ona

čtvrtá koncová jednotka. Jelikož však ostatní špičky (koncové jednotky) mají relativně stejnou výkonovou úroveň lze usoudit, že čtvrtá koncová jednotka nepracuje správně.

### POROVNÁNÍ VÝSLEDKŮ PRO DRUHÉ UMÍSTĚNÍ ZESILOVACÍHO PRVKU

Na Obr. č. 7.26 můžeme vidět optické spektrum získané při simulaci a při praktickém měření ve směru downstream.



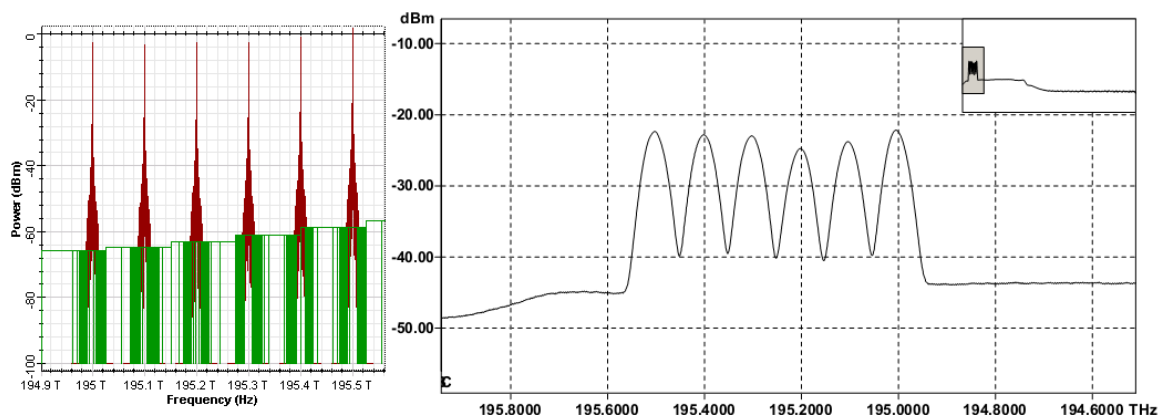
Obr. 7.26: Porovnání optického spektra simulace/praktické měření ve směru downstream.

Z tohoto obrázku je na první pohled viditelný rozdíl v šířce spektrální čáry pro jednotlivé kanály. Tento rozdíl odpovídá odlišným laserům použitým ve vysílacích částech. Zatím co v simulaci byl použit laser s úzkou spektrální čarou (odpovídá DFB laseru), reálná síť WDM-PON platformy LG-Ericsson EAST 1100 Release 3 používá FP lasery, které nabývají větších šířek spektrální čáry než zmíněné DFB lasery.

Dalším z viditelných nerovností je výkonová nerovnost v jednotlivých kanálech, která mohla být způsobena dvěma faktory. Buď vlastností FP laseru, kdy FP laser na základě stimulačního impulsu se naladí na odpovídající vlnovou délku, ale s různou výkonovou úrovní, nebo vlastností zesilovače, který nenabývá konstantního zisku na celém optickém spektru.

V charakteristikách si můžeme všimnout také velké nerovnosti mezi výkonovými úrovněmi v simulaci a praktického měření. Část této nerovnosti můžeme určitě přisoudit faktu, že v praktickém měření byl použit dělicí prvek 1:2 (70:30), který při sestavování topologie nelze vyloučit. Avšak nepatrnou část nerovnosti můžeme přisoudit také simulaci a jejím nastaveným parametrům, hlavně pak vysílacímu výkonu OLT jednotky, kdy výrobce LG-Ericsson ve svém manuálu neuvádí přesnou hodnotu výkonu pro jeden kanál (museli jsme tuto hodnotu dopočítat).

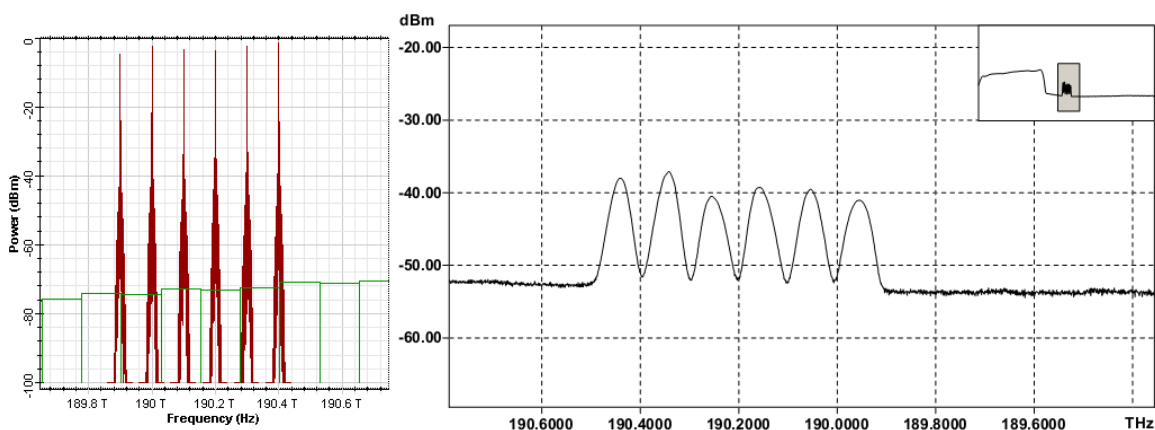
Na Obr. č. 7.27 můžeme vidět optické spektrum získané při simulaci a při praktickém měření ve směru upstream. V obou případech optického spektra (simulace/praktické měření) se uplatňují stejné vlivy, které byly popsány pro směr downstream. Dále si zde můžeme všimnout nerovnoměrného zesílení v jednotlivých kanálech, způsobené vlastností zesilovače EDFA.



Obr. 7.27: Porovnání optického spektra simulace/praktické měření ve směru upstream.

### POROVNÁNÍ VÝSLEDKŮ PRO TŘETÍ UMÍSTĚNÍ ZESILOVACÍHO PRVKU

Na Obr. č. 7.28 můžeme vidět optické spektrum získané při simulaci a při praktickém měření ve směru downstream.

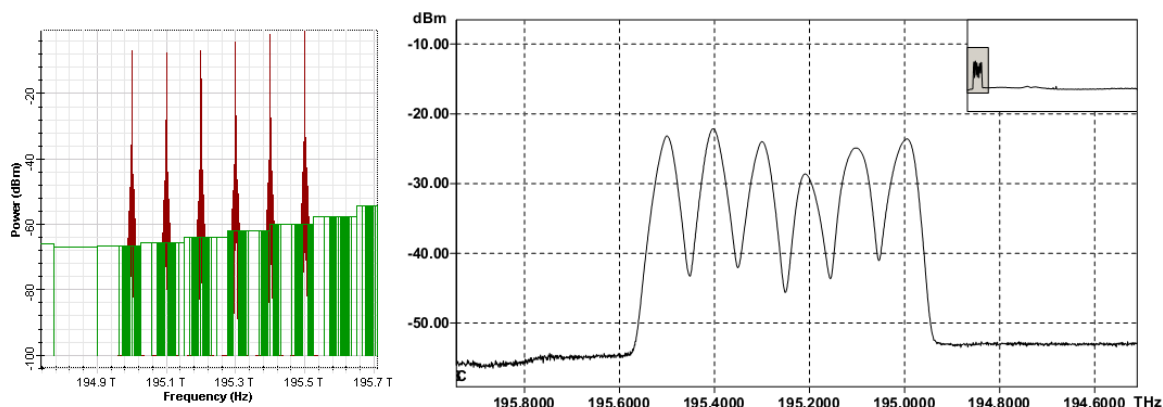


Obr. 7.28: Porovnání optického spektra simulace/praktické měření ve směru downstream.

Z tohoto obrázku je na první pohled viditelný rozdíl v šířce spektrální čáry pro jednotlivé kanály. Tento rozdíl odpovídá odlišným laserům použitým ve vysílacích částech. Zatím co v simulaci byl použit laser s úzkou spektrální čarou (odpovídá DFB laseru), reálná síť WDM-PON platformy LG-Ericsson EAST 1100 Release 3 používá FP lasery, které nabývají větších šířek spektrální čáry než zmíněné DFB lasery.

Dalším z viditelných nerovností je výkonová nerovnost v jednotlivých kanálech, která mohla být způsobena dvěma faktory. Buď vlastností FP laseru, kdy FP laser na základě stimulačního impulsu se naladí na odpovídající vlnovou délku, ale s různou výkonovou úrovní, nebo vlastností zesilovače, který nenabývá konstantního zisku na celém optickém spektru.

V charakteristikách si můžeme všimnout také velké nerovnosti mezi výkonovými úrovněmi v simulaci a praktického měření. Část této nerovnosti můžeme určitě přisoudit faktu, že v praktickém měření byl použit dělicí prvek 1:2 (70:30), který při sestavování topologie nelze vyloučit. Avšak nepatrnou část nerovnosti můžeme přisoudit také simulaci a jejím nastavením



Obr. 7.29: Porovnání optického spektra simulace/praktické měření ve směru upstream.

parametrům, hlavně pak vysílacímu výkonu OLT jednotky, kdy výrobce LG-Ericsson ve svém manuálu neuvádí přesnou hodnotu výkonu pro jeden kanál (museli jsme tuto hodnotu dopočítat).

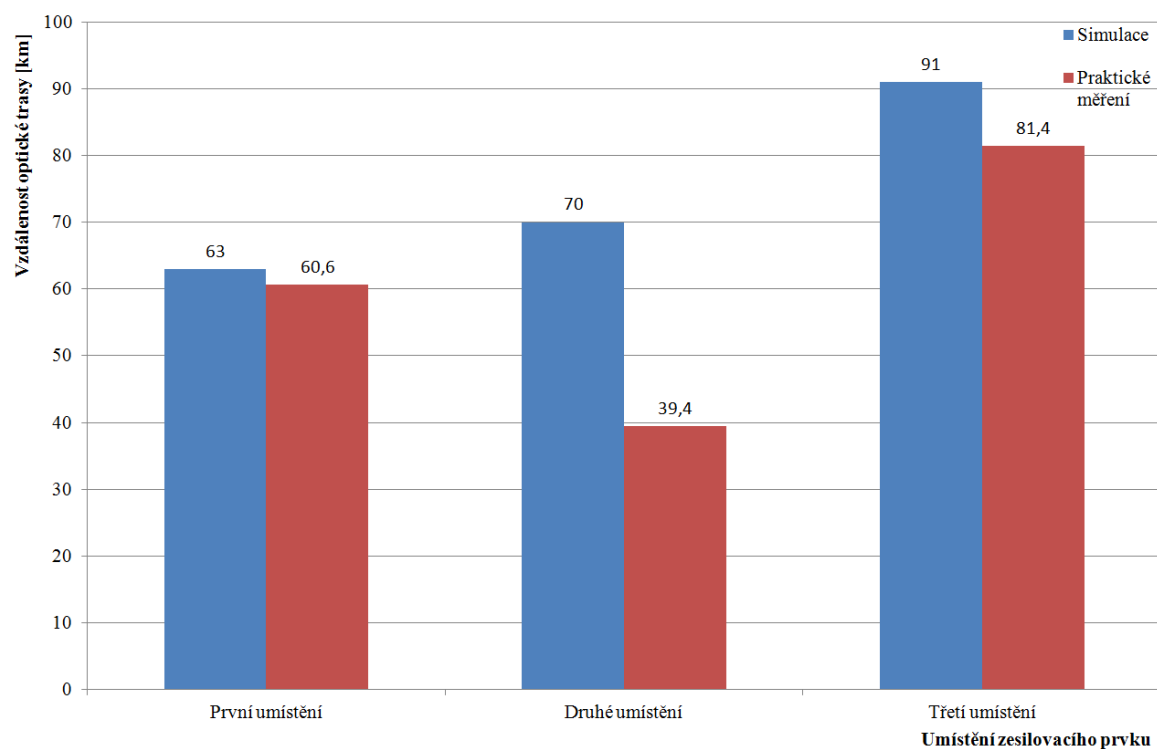
Na Obr. č. 7.29 můžeme vidět optické spektrum získané při simulaci a při praktickém měření ve směru upstream. V obou případech optického spektra (simulace/praktické měření) se uplatňují stejné vlivy, které byly popsány pro směr downstream. Navíc se zde objevuje výkonová nerovnost čtvrté špičky (odpovídá čtvrté koncové jednotce) oproti ostatním. Což je způsobeno simulovaným maximálním dosahem WDM-PON sítě, kdy na něj měla vliv právě ona čtvrtá koncová jednotka.

### POROVNÁNÍ VÝSLEDKŮ PRO MAXIMÁLNÍ DOSAH TOPOLOGIÍ

Na Obr. č. 7.30 pak můžeme vidět graf znázorňující maximální dosah jednotlivých topologií (různé umístění zesilovače) zjištěný v simulaci a praktickém měření pro optický vláknový zesilovač EDFA. Pro první umístění zesilovacího prvku (downstream výkonový zesilovač, upstream předzesilovač) se maximální dosah liší pouze o necelé 3 km. Pro druhé umístění zesilovacího prvku (v obou směrech průběžný zesilovač) je rozdíl o hodně vyšší 30 km. Možné vysvětlení tak velké difference je, že použitý zesilovač CLA-PB01F není primárně určen pro funkci průběžného zesilovače. Výrobce jej doporučuje použít buď jako výkonový zesilovač nebo jako předzesilovač. Pro poslední umístění zesilovacího prvku (downstream předzesilovač, upstream výkonový zesilovač) je rozdíl necelých 10 km.

Odhalené rozdíly maximálního dosahu pro jednotlivé umístění zesilovacího prvku mohou být způsobeny tím, že v praktickém měření narostl vložný útlum celkové optické trasy, použitím velkého počtu prvků, se kterými se v simulaci nepočítalo (např. velký počet redukčních optických patchcordů, spojky, cirkulátory pro oddělení provozu atd.).





Obr. 7.30: Zjištěný maximální dosah optických tras simulace/praktické měření pro EDFA zesilovač.

## 8 Závěr

Cílem této diplomové práce bylo poukázat na možnosti aplikování zesilovacích prvků do optických přístupových sítí. Vytvořené síťové topologie s aplikovaným zesilovacím prvkem jsou dobrým řešením jak zvýšit maximální dosah stávajících standardů na poslední části telekomunikační sítě.

První část práce se zabývá teoretickým rozbořem zadané problematiky. Blíže je zde popsán vlnový multiplex a jeho podrobné dělení, dále pak kompletní popis optických přístupových sítí (pasivních, aktivních) jejich standardů a další generace optických sítí, do kterých se řadí sítě dlouhých dosahů a v neposlední řadě také základní rozbor tří nejpoužívanějších zesilovacích prvků (optický vláknový zesilovač, polovodičový optický zesilovač, Ramanův zesilovač). Pro vypracování těchto kapitol bylo čerpáno z různých literárních pramenů, které jsou vyznačeny v seznamu literatury a posléze v textu citovány.

V druhé části práce byly vytvořeny dvě různé síťové topologie v simulačním prostředí Optiwave 10.0. První topologie se zaměřovala na sítě dlouhých dosahů, jmenovitě byl navržen standard Long reach PON. Samotný návrh modelu vycházel z popisu uvedeného v kapitole 3.4.2. Zhodnotíme-li výsledky dosažené v simulačním prostředí, zjistíme, že kvalitativní parametry na obou koncích sítě i pro vzdálenost optické trasy přes 100 km při symetrické přenosové rychlosti 10 Gbit/s nabývají velmi uspokojivých hodnot. Dle zadání byla vytvořena i druhá topologie xWDM sítě, konkrétně se jednalo o WDM-PON síť. Při návrhu jsme kladli důraz, aby navrhovaná síť se co nejvíce podobala reálné přístupové síti nacházející se na Katedře telekomunikační techniky VŠB-TU Ostrava. Do navržené a otestované WDM-PON sítě jsme posléze aplikovali tři nejběžnější typy optických zesilovačů, kdy jejich umístění bylo voleno dle zažitých standardů. V rámci porovnání se simulace opakovala pro tři různé přenosové rychlosti (125 Mbit/s; 1,25 Gbit/s; 2,5 Gbit/s). Zhodnotíme-li výsledky dosažené v simulačním prostředí, zjistíme, že nejvyšší výkonnosti dosáhly topologie, ve kterých se aplikoval optický vláknový zesilovač, poté následoval Ramanovský zesilovač se zesilovačem polovodičovým. Tyto dva zesilovače dosahovali maximální vzdálenosti optické trasy při požadované bitové chybovosti  $10^{-12}$  o desítky kilometrů méně, než tomu bylo u vláknově optických zesilovačů. Také se zvyšující se přenosové rychlosti se dosah linek zmenšoval.

Hlavní náplní této práce však bylo praktické měření na již zmíněné reálné síti WDM-PON s aplikovaným vláknovým zesilovačem EDFA a následné porovnání dosažených výsledků se simulacemi. Směrodatným ukazatelem pro porovnání jednotlivých výsledků se jevil optický spektrální analyzátor, jehož výstupy se srovnaly s naměřenými charakteristikami zjištěnými v simulacích. V samotném měření jsme ověřili fakt, který se již na začátku vypracovávání práce dal očekávat. Těto fakt tkví v tom, že použitý zesilovač CLA PB01F je pro svoji práci primárně určen ve vlnovém pásmu C a nenabývá tak dobrých zesilovacích vlastností v pásmu L, které používá WDM-PON platforma na komunikaci ve směru downstream. Skutečná hodnota zisku v jednotlivých kanálech nabývala více jak o polovinu menší hodnoty, než byl nastaven zisk na zesilovači. Po celkovém vyhodnocení a rozboru jednotlivých parametrů dospějeme k závěru, že simulace do jisté míry jsou vždy idealizované a nabývají spíše informativní charakter, nelze je tedy použít, jako konečný podklad pro vybudování optické přístupové sítě.

Co se týče aplikování optických zesilovačů do optických přístupových sítí je to jedno ne-li jediné řešení, jak snadně a efektivně prodloužit optickou trasu na stávajících trasách a přivést

optickou linku tam, kde to ještě v nedávné době bylo nemyslitelné. Jako nejvhodnějším adeptem pro aplikování zesilovacího prvku se jeví optický vláknový zesilovač. Nicméně jsme v této práci dokázali, že vláknový zesilovač EDFA není nejideálnějším řešením pro nasazení v sítích založených na vlnovém multiplexu (WDM-PON), kvůli nedostačující pracovní vlnové oblasti. Proto by bylo vhodné nasazení a otestování nového typu vláknového zesilovače ET DFA (Telluride based erbium doped fiber amplifier), který dosahuje stejných zesilovacích vlastností v obou využívaných vlnových pásmech C a L.

Tato diplomová práce poskytuje čtenářům věcnou představu o tom, co obnáší návrh modelu v simulačním prostředí Optiwave a následné odladění, než se dosažené výsledky alespoň trochu podobají reálným hodnotám. Důkladně jsou také popsány postupy pro analýzu přenosových parametrů optické trasy přístupové sítě založené na vlnovém multiplexu (WDM-PON).

## Literatura

- [1] SALEH, Bahaa E. A.; TEICH, Malvin Carl. *Základy Fotoniky: svazek 3*. Praha: MATFYZPRESS, 1995. 778 s. ISBN 80-85863-05-7.
- [2] ŠÍMA, Jaromír. DWDM pro metropolitní síť v kombinaci s CWDM a jedno vlákno. *WDM Systems SUMMIT 2011* [online]. Září 2010. Dostupný z WWW: <<http://www.wdmsummit.cz/>>.
- [3] ŠIŠKA, Petr; LÁTAL, Jan. *Telekomunikační síť: Pasivní optické přístupové síť*. VŠB-TU Ostrava: 6.2.2009. s. 16.
- [4] LAFATA, Pavel; VODRÁŽKA, Jiří. Současné a budoucí varianty pasivních optických přístupových sítí. *Elektrorevue* [online]. 26.7.2009, 2009/39. Dostupný z WWW: <<http://www.elektrorevue.cz/cz/clanky/komunikacni-technologie/>>. ISSN 1213-1539.
- [5] ŠIFTA, Radim; FILKA, Miloslav. Simulace a měření vlnových multiplexů pro pasivní optické síť. *Elektrorevue* [online]. 13.6.2011, 2011/27. Dostupný z WWW: <<http://www.elektrorevue.cz/cz/clanky/komunikacni-technologie/>>. ISSN 1213-1539.
- [6] LAM, Cedric F. *Passive Optical Networks : PRINCIPLES AND PRACTICE*. London: Academic Press, 2007. 324 s. ISBN 978-0-12-373853-0.
- [7] LAFATA, Pavel; VODRÁŽKA, Jiří. Pasivní optická síť GPON. *Access server* [online]. 23. 05. 2009. Dostupný z WWW: <<http://access.feld.cvut.cz/>>. ISSN 1214-9675.
- [8] LAFATA, Pavel; VODRÁŽKA, Jiří. Pasivní optická síť EPON. *Access server* [online]. 23. 05. 2009. Dostupný z WWW: <<http://access.feld.cvut.cz/>>. ISSN 1214-9675.
- [9] LAFATA, Pavel. Pasivní optické síť s rychlostí 10 Gbit/s. *Access server* [online]. 10. 03. 2011. Dostupný z WWW: <<http://access.feld.cvut.cz/>>. ISSN 1214-9675.
- [10] LAFATA, Pavel. Pasivní optické síť WDM-PON . *Access server* [online]. 24. 05. 2009. Dostupný z WWW: <<http://access.feld.cvut.cz/>>. ISSN 1214-9675.
- [11] HLADKÝ, Miroslav; ŠIŠKA, Petr. VŠB Ostrava Experimentální pracoviště WDM PON. *Profiber* [online]. 2010, 1. Dostupný z WWW:<<http://www.profiber.cz/>>.
- [12] SHEA, Darren P.; MITCHELL, John E. Long-Reach Access Technologies. *IEEE Network*. Září/Ríjen 2007, s. 11.
- [13] LUCKI, Michal. Optické komunikační systémy. *Comtel*. s. 11. Dostupný také z WWW: <<http://www.comtel.cz/files/download.php?id=4532>>.

- [14] BECKER, P. C.; OLSSON, N. A.; SIMPSON, J. R. Erbium-Doped Fiber Amplifiers: Fundamentals and technology. London: Academic Press, 1999. 460s. ISBN 0-12-084590-3.
- [15] BOHÁČ L. Optické zesilovače v telekomunikační technice [online]. Dostupný z WWW: <<http://www.comtel.cz/files/download.php?id=4977>>.
- [16] Safibra, s.r.o. - OPTOVLÁKNOVÉ ZESILOVAČE [online]. 1999-2008 Dostupný z WWW: <<http://www.safibra.cz/cesky/produkty/zesilovace/pdfa.html>>
- [17] VAŠINEK, Vladimír. Optoelektronika III: Přednáška č. 4. 2011.
- [18] OLSSON, N. Anders. Semiconductor Optical Amplifiers. IEEE. Březen 1992, 3. Dostupný také z WWW: <[http://ieeexplore.ieee.org/xpls/abs\\_all.jsp?arnumber=135354&tag=1](http://ieeexplore.ieee.org/xpls/abs_all.jsp?arnumber=135354&tag=1)>.
- [19] HEADLEY, Clifford ; AGRAWAL, Godvind P. Raman Amplification : in fiber optical communication systems. London: Elsevier Academic Press, 2005. 374 s. ISBN 0-12-044506-9.
- [20] BURČÍK, Jaroslav. Ramanovské zesilovače pro telekomunikac. *Access server* [online]. 29. 03. 2006. Dostupný z WWW: <<http://access.feld.cvut.cz>>. ISSN 1214-9675.
- [21] RAMASWAMI, Rajiv, Kumar N. SIVARAJAN a Galen H. SASAKI. Optical Networks: A Practical Perspective. Třetí. USA: Elsevier, 2010. ISBN 978-0-12-374092-2.
- [22] TREJKAL, Vladimír, Miloslav FILKA, Pavel REICHT a Jan ŠPORIK. Dvoustavové modulační formáty v optických přístupových sítích. AEEE (Advances in Electrical and Electronic Engineering): Optics and Optoelectronic [online]. 2010, roč. 8, č. 4, 96 - 101 [cit. 2012-03-1]. ISSN 1804-3119. Dostupný také z WWW:<<http://advances.utc.sk/index.php/AEEE/article/view/31>>
- [23] PROFiber Networking s.r.o., Praha, Interní literatura, [online]. Dostupný z WWW: <<http://www.profiber.cz>>
- [24] VYDIS a.s., Praha, Interní literatura, [online]. Dostupný z WWW: <<http://www.vydis.cz>>

## **Příloha**

### **A Schémata zapojení simulačních topologií**

### **B Výsledky simulací WDM-PON sítě s aplikovaným zesilovacím prvkem**

### **C Obsah CD**

C.1 Elektronická verze práce

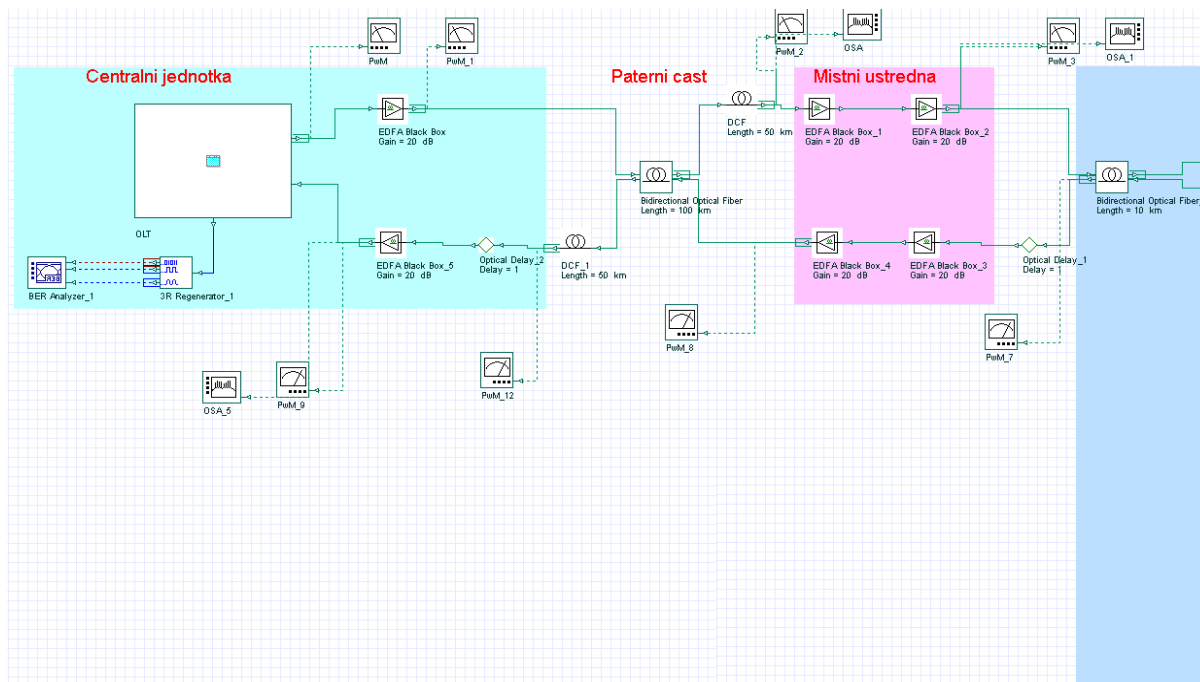
C.2 Naměřené výsledky přenosových a kvalitativních parametrů získaných při simulaci

C.3 Soubory s navrženými topologiemi z programu Optiwave 10.0.

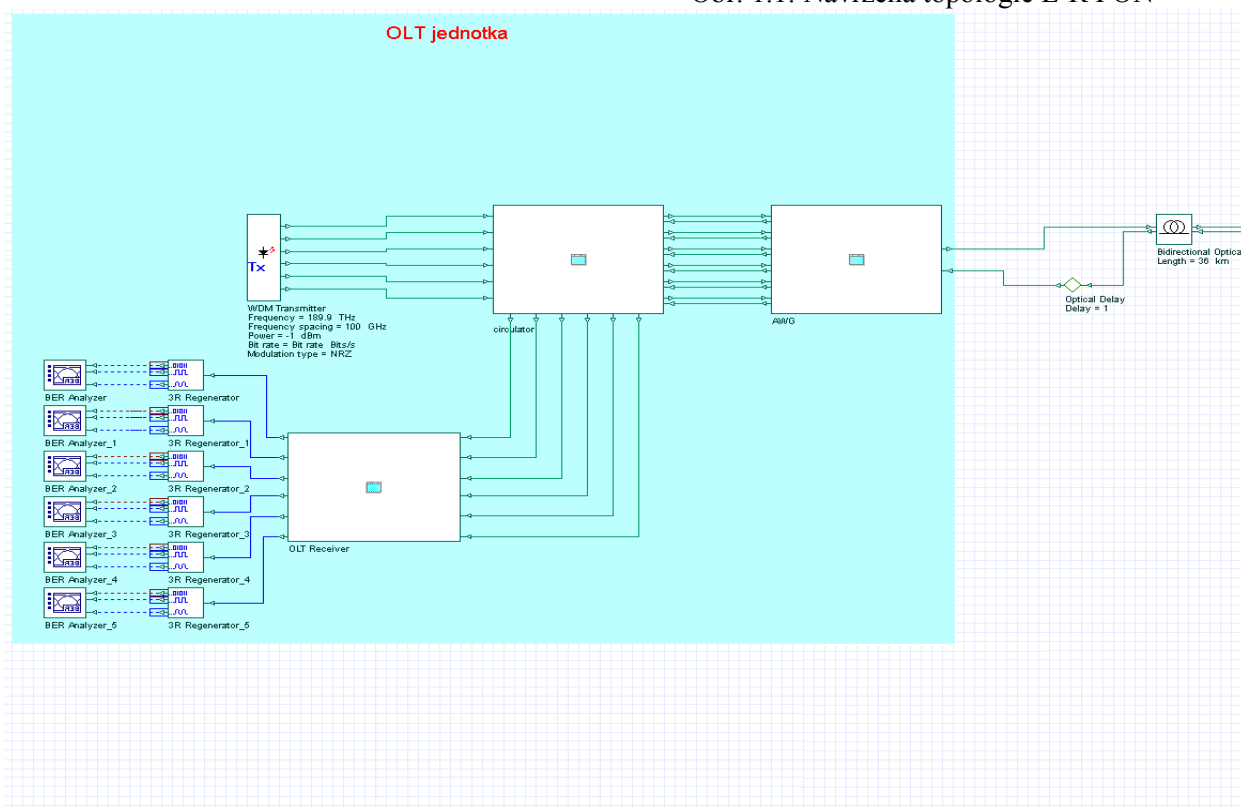
C.4 Reporty z měření

C.5 Fotografie z průběhu měření

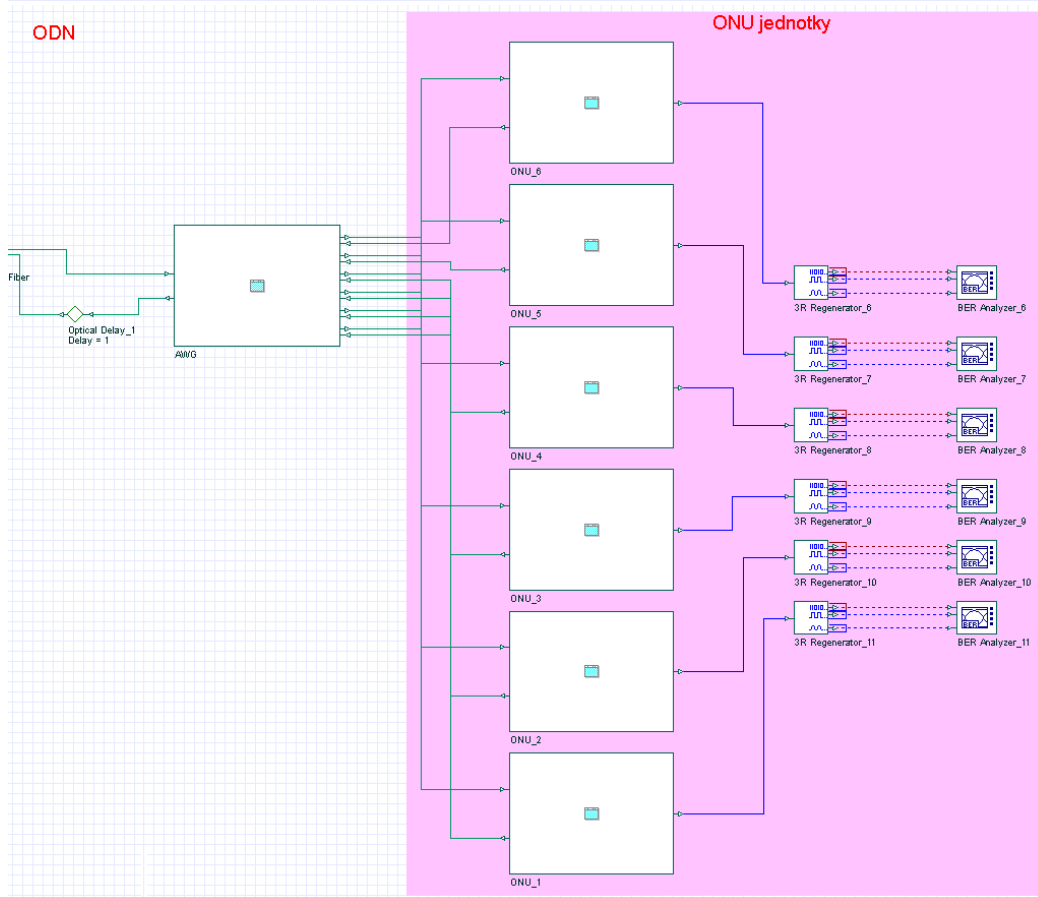
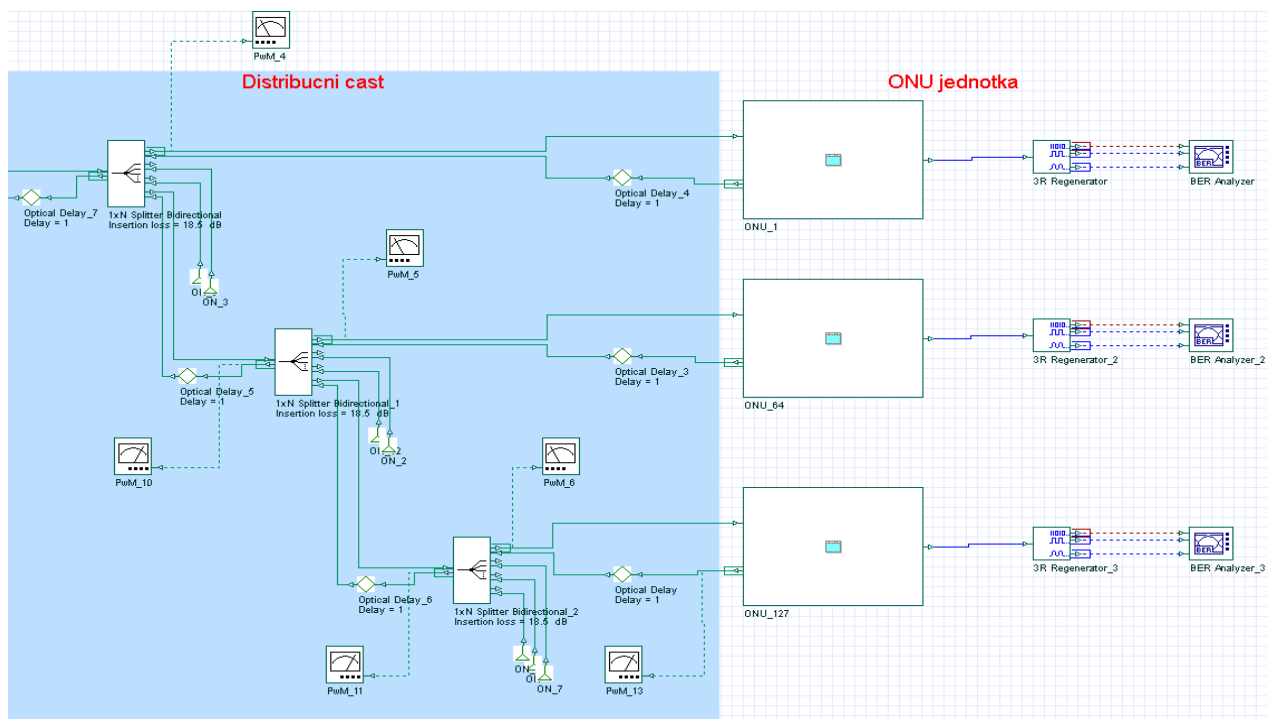
## A Schémata zapojení simulačních topologií



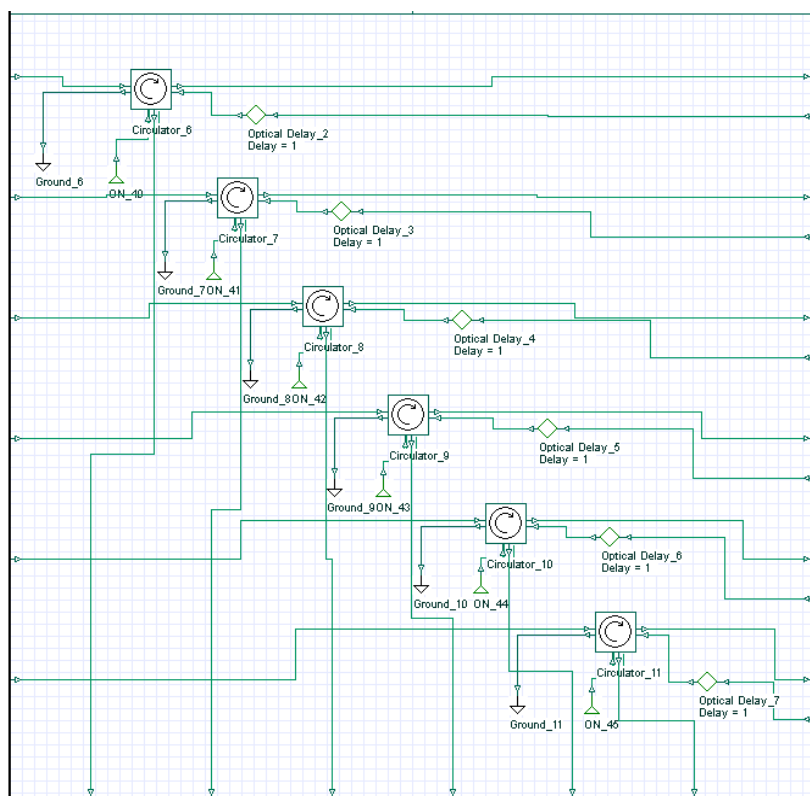
Obr. 1.1: Navržená topologie L-R PON



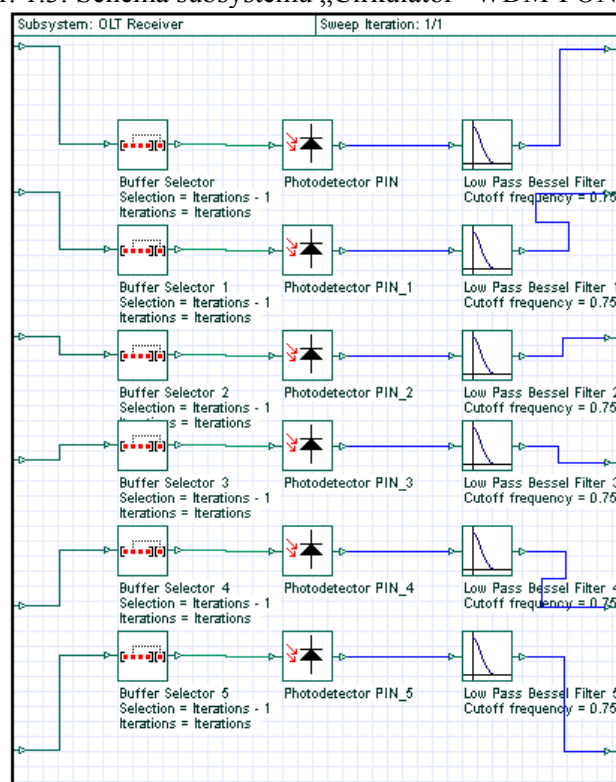
Obr. 1.2: Navržená topologie WDM-PON



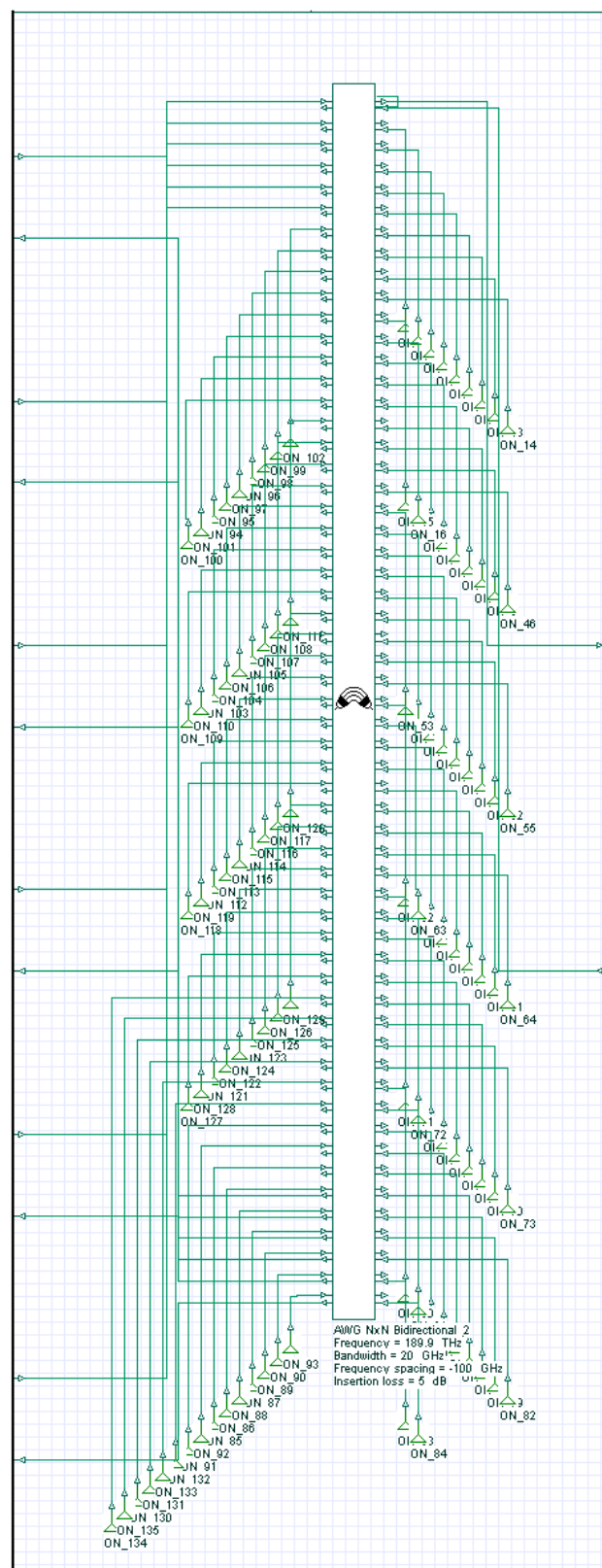




Obr. 1.3: Schéma subsystému „Cirkulator“ WDM-PON sítě



Obr. 1.4: Schéma subsystému „OLT Receiver“ WDM-PON sítě



Obr. 1.5: Schéma subsystému „AWG“ WDM-PON sítě

## B Výsledky simulací WDM-PON sítě s aplikovaným zesilovacím prvkem

### B.1 Výsledky simulací pro přenosovou rychlost 125 Mbit/s

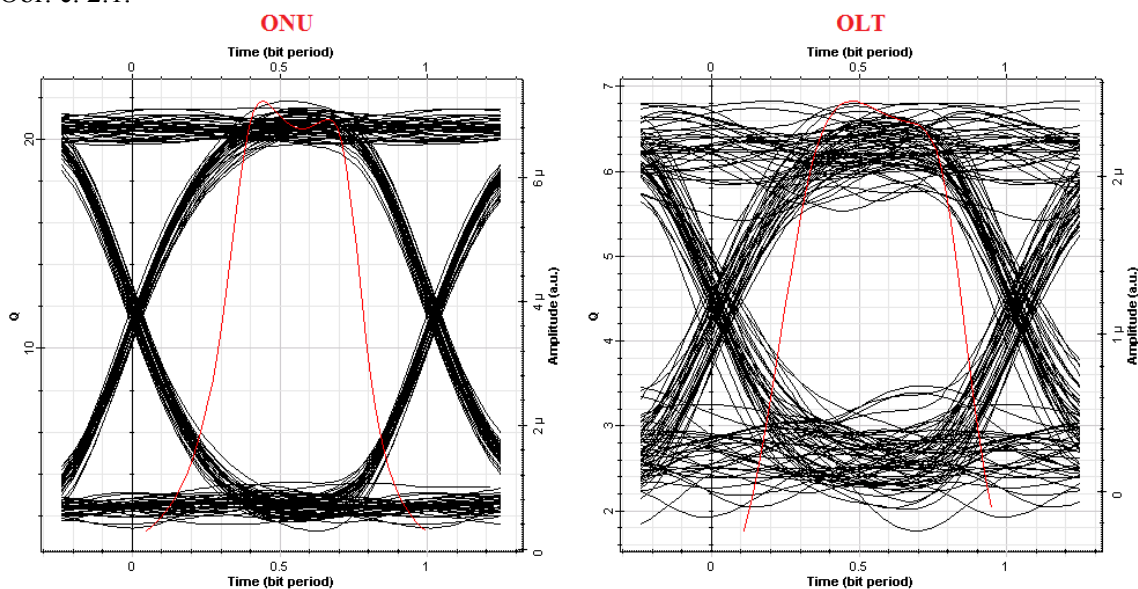
V této podkapitole se nacházejí naměřené výsledky pro přenosovou rychlost 125 Mbit/s a pro tři různá umístění zesilovacího prvku. První umístění je umístění na začátku optické trasy, což odpovídá výkonovému zesilovači ve směru downstream a předzesilovači ve směru upstream. Druhé umístění se nachází někde v optické trase, kdy zesilovací prvek má v obou směrech funkci průběžného zesilovače. Poslední umístění odpovídá předzesilovači ve směru downstream a výkonovému zesilovači ve směru upstream.

Požadovaná bitová chybovost  $BER = 10^{-12}$  v jednom ze směrů navrhnuté WDM-PON topologie byla pro přenosovou rychlost 125 Mbit/s a bez aplikovaného zesilovacího prvku dosažena při vzdálenosti optické trasy 36 km. Zjištěné hodnoty  $Q$  – faktoru a BER pro pospanou situaci jsou zaznamenány v Tab. č. 2.1.

Parametr	Downstream	Upstream
Q-faktor [-]	21,682	6,838
BER [-]	$1,53 \cdot 10^{-104}$	$4,01 \cdot 10^{-12}$

Tab. 2.1: Naměřené hodnoty kvalitativních parametrů pro maximální dosah.

Těmto hodnotám kvalitativních parametrů odpovídají diagramy oka znázorněné na Obr. č. 2.1.



Obr. 2.1: Diagramy oka na obou koncích přístupové sítě.

### B.1.1 První umístění zesilovače

#### EDFA

Jak již bylo zmíněno v úvodu podkapitoly, první umístění zesilovacího prvku odpovídá výkonovému zesilovači ve směru downstream s nastaveným ziskem 10 dB a předzesilovači ve směru upstream s nastavenou hodnotou zisku 20 dB.

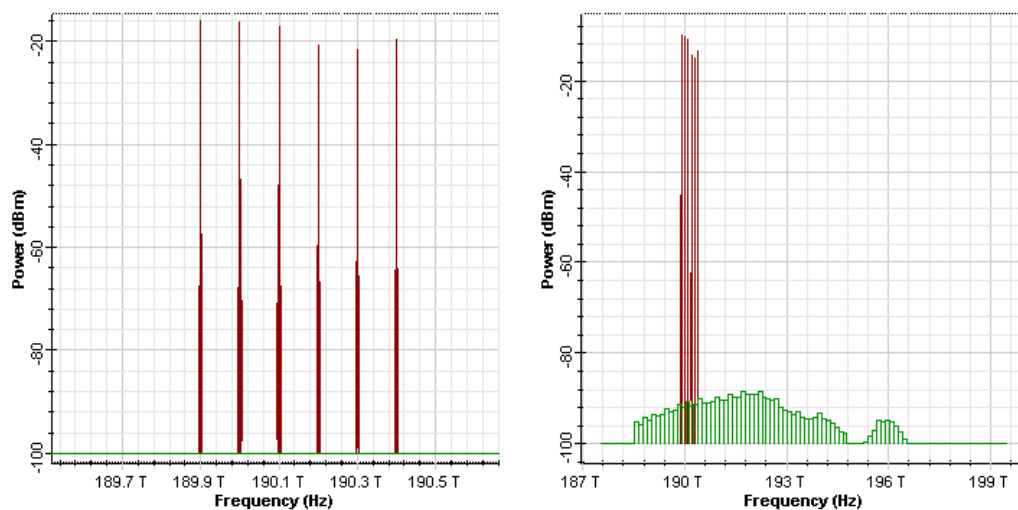
Dosažené výkonové úrovně v prvním kanále po aplikování zesilovacího prvku jsou zaznamenány v Tab. č. 2.2.

	Downstream		Upstream	
Parametr	Před zesilovačem	Za zesilovačem	Před zesilovačem	Za zesilovačem
P [dBm]	-9,59	-3,234	-23,23	-11,518
OSNR [dB]	90,41	47,028	76,77	25,847
Rozdíl kanálů [dBm]	0,056	0,209	0,0002	3,961

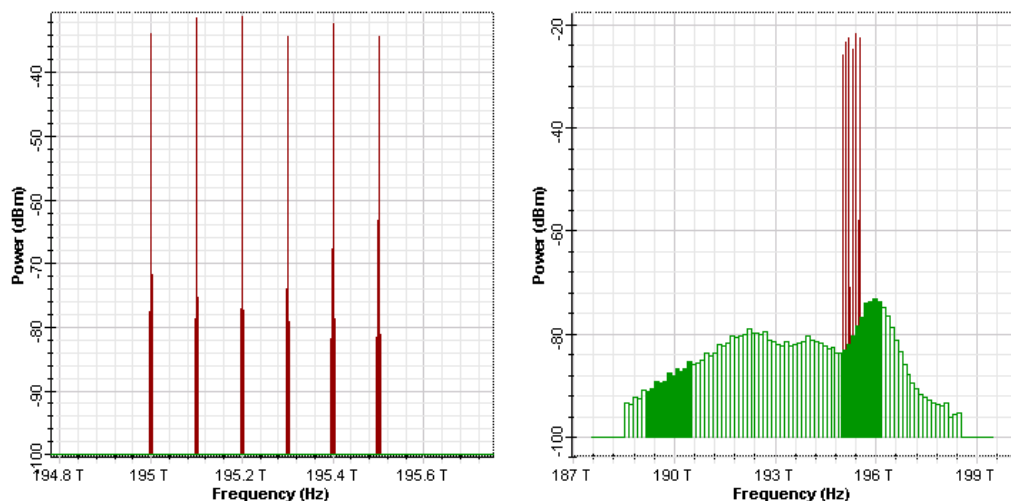
Tab. 2.2: Naměřené hodnoty parametrů pro vložený zesilovací prvek.

Navržený zesilovací prvek dodal optickému signálu v prvním kanálu WDM-PON sítě zisk v downstreamu 6,36 dB a v upstreamu 11,71 dB.

Optické spektrum s přídavným šumem před a za zesilovačem je možné vidět na Obr. č. 2.2; Obr. č. 2.3.



Obr. 2.2: Optické spektrum před a za zesilovačem pro směr downstream.

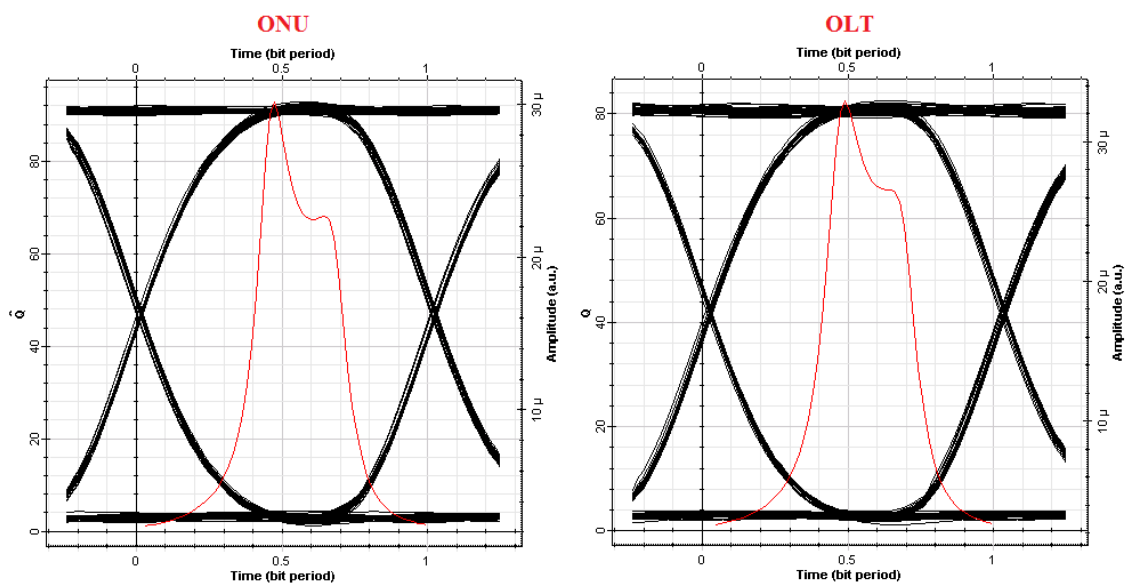


Obr. 2.3: Optické spektrum před a za zesilovačem pro směr upstream.

Kvalitativní parametry Q-faktor a BER, dosáhly po vložení zesilovacího prvku hodnot (viz Tab. č. 2.3) a jim odpovídají diagramy oka vykreslené na Obr. č. 2.4.

Parametr	Downstream	Upstream
Q-faktor [-]	92,828	82,507
BER [-]	0	0

Tab. 2.3: Naměřené hodnoty kvalitativních parametrů pro vložený zesilovací prvek.



Obr. 2.4: Diagramy oka na obou koncích přístupové sítě s vloženým zesilovacím prvkem.

Požadovaná bitová chybovost  $BER = 10^{-12}$  v jednom ze směrů byla pro navržený model s aplikovaným zesilovacím prvkem dosažena při vzdálenosti optické trasy 82 km. Při takto nastavené vzdálenosti dosáhly kvalitativní parametry hodnot (viz Tab. č. 2.4).

Parametr	Downstream	Upstream
Q-faktor [-]	7,057	41,86
BER [-]	$1,82 \cdot 10^{-12}$	0

Tab. 2.4: Naměřené hodnoty kvalitativních parametrů pro maximální dosah.

### RAMANŮV ZESILOVAČ

V dalším scénáři pro první umístění zesilovače se do trasy místo EDFA implementoval Ramanův zesilovač, jehož model je blíže specifikován v podkapitole 6.2.1.

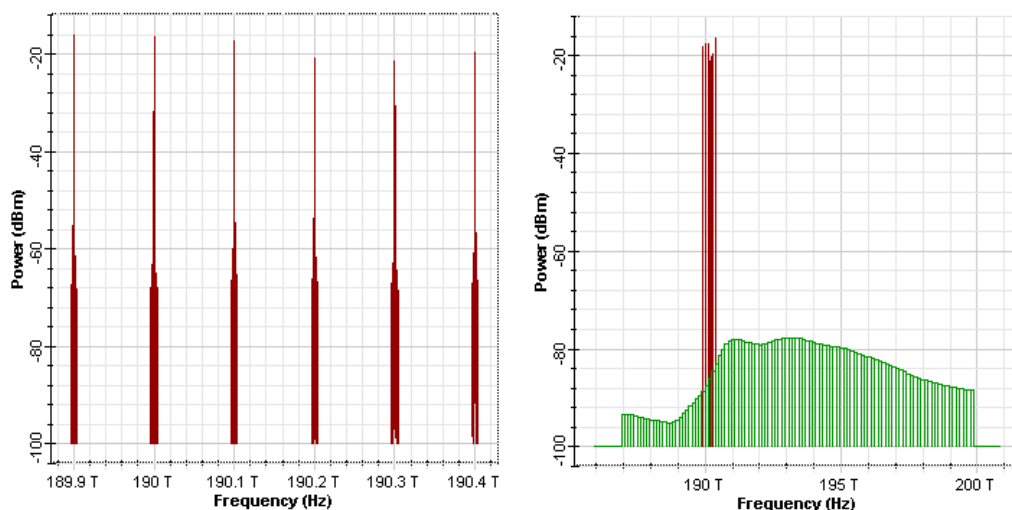
Dosažené hodnoty výkonových úrovní v prvním kanálu po aplikování zesilovacího prvku jsou zaznamenány v Tab. č. 2.5.

	Downstream		Upstream	
Parametr	Před zesilovačem	Za zesilovačem	Před zesilovačem	Za zesilovačem
P [dBm]	-9,59	-6,243	-23,23	-16,34
OSNR [dB]	90,41	35,7	76,77	23,144
Rozdíl kanálů [dBm]	0,056	5,436	0,0002	0,949

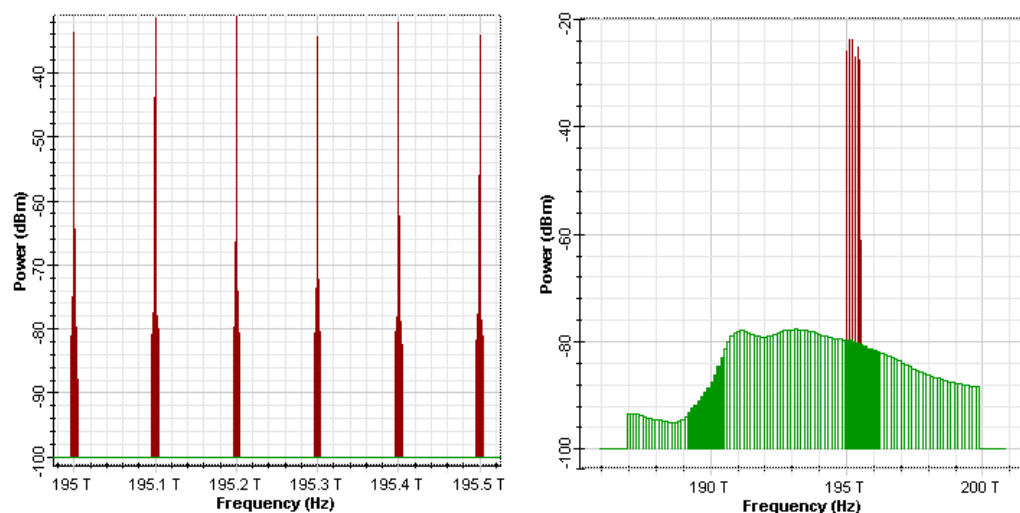
Tab. 2.5: Naměřené hodnoty parametrů pro vložený zesilovací prvek.

Navržený zesilovací prvek dodal optickému signálu v prvním kanálu zisk v downstreamu 3,35 dB a v upstreamu 6,89 dB.

Optické spektrum s přídavným šumem před a za zesilovačem je možné vidět na Obr. č. 2.5; Obr. č. 2.6.



Obr. 2.5: Optické spektrum před a za zesilovačem pro směr downstream.

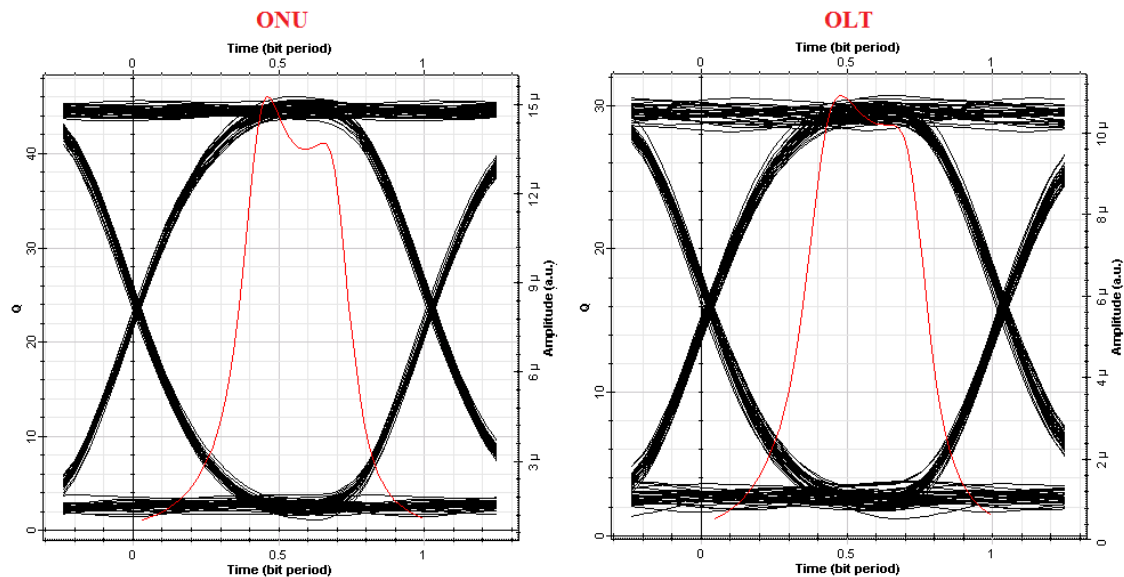


Obr. 2.6: Optické spektrum před a za zesilovačem pro směr upstream.

Kvalitativní parametry Q-faktor a BER, dosáhly po vložení zesilovacího prvku hodnot (viz Tab. č. 2.6) a jim odpovídají diagramy oka vykreslené na Obr. č. 2.7.

Parametr	Downstream	Upstream
Q-faktor [-]	46,038	30,693
BER [-]	0	$3,05 \cdot 10^{-206}$

Tab. 2.6: Naměřené hodnoty kvalitativních parametrů pro vložený zesilovací prvek.



Obr. 2.7: Diagramy oka na obou koncích přístupové sítě s vloženým zesilovacím prvkem.

Požadovaná bitová chybovost  $BER = 10^{-12}$  v jednom ze směrů byla pro navržený model s aplikovaným zesilovacím prvkem dosažena při vzdálenosti optické trasy 64 km. Při takto nastavené vzdálenosti dosáhly kvalitativní parametry hodnot (viz Tab. č. 2.7).

Parametr	Downstream	Upstream
Q-faktor [-]	9,465	6,952
BER [-]	$1,47 \cdot 10^{-21}$	$1,59 \cdot 10^{-12}$

Tab. 2.7: Naměřené hodnoty kvalitativních parametrů pro maximální dosah.

### SOA

V posledním scénáři pro první umístění zesilovače se do trasy implementoval SOA zesilovač, jehož model je popsán v podkapitole 6.2.1. Ovšem tento zesilovač optický signál vůbec nezesiloval z důvodu velkých výkonových úrovní na jeho vstupu (neustále pracoval v saturačním režimu). Bylo tedy nutné před něj umístit optický útlumový článek, který signál před vstupem do zesilovače utlumil. V downstreamu měl útlumový člen hodnotu 20 dB v upstreamu pak 15 dB.

Dosažené hodnoty výkonových úrovní v prvním kanále po aplikování zesilovacího prvku s útlumovým členem jsou zaznamenány v Tab. č. 2.8.

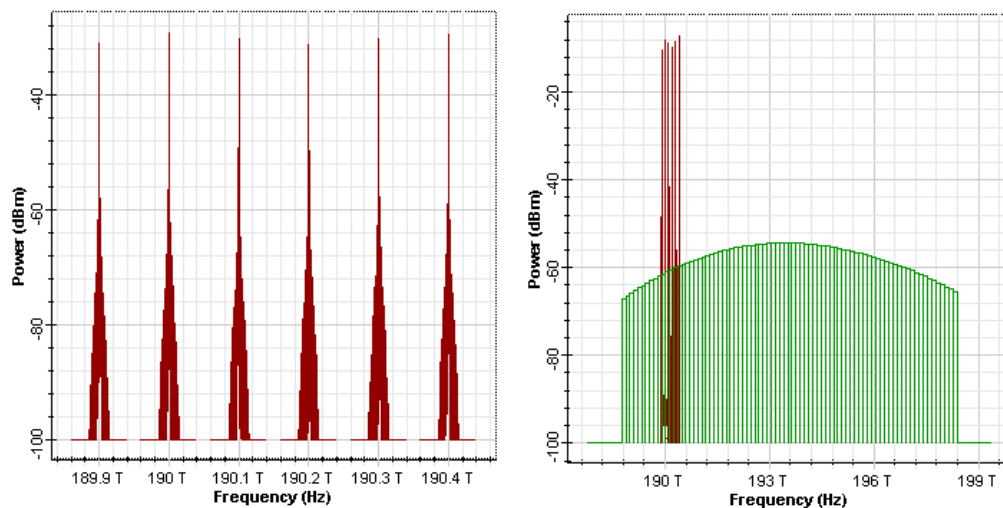
	Downstream		Upstream	
Parametr	Před zesilovačem	Za zesilovačem	Před zesilovačem	Za zesilovačem
P [dBm]	-29,59	-5,421	-38,23	-10,29
OSNR [dB]	70,396	32,621	65,993	16,732
Rozdíl kanálů [dBm]	0,056	2,98	0,0005	0,969

Tab. 2.8: Naměřené hodnoty parametrů pro vložený zesilovací prvek.

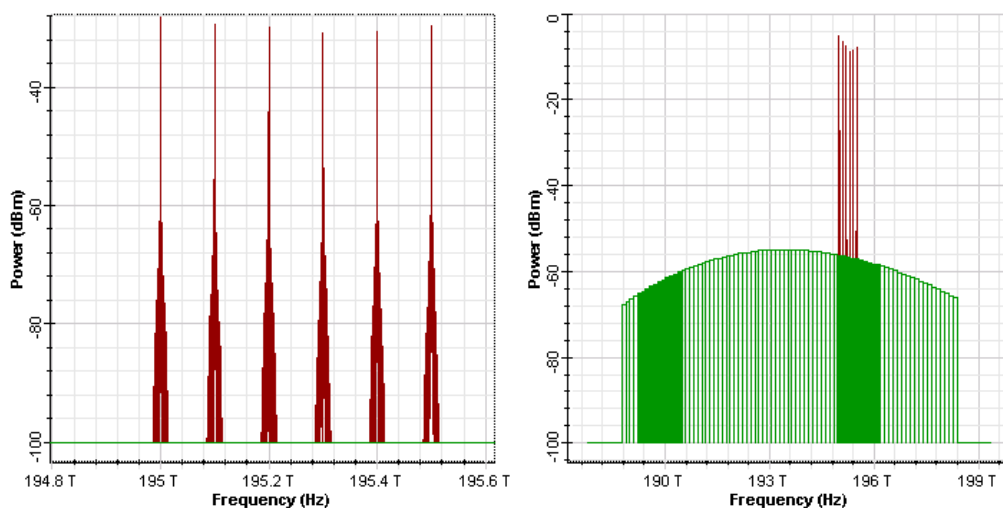
Navržený zesilovací prvek dodal optickému signálu v prvním kanálu zisk v downstreamu 24,17 dB a v upstreamu 27,94 dB.

Optické spektrum s přídavným šumem před a za zesilovačem je možné vidět na Obr. č. 2.8; Obr. č. 2.9.





Obr. 2.8: Optické spektrum před a za zesilovačem pro směr downstream.

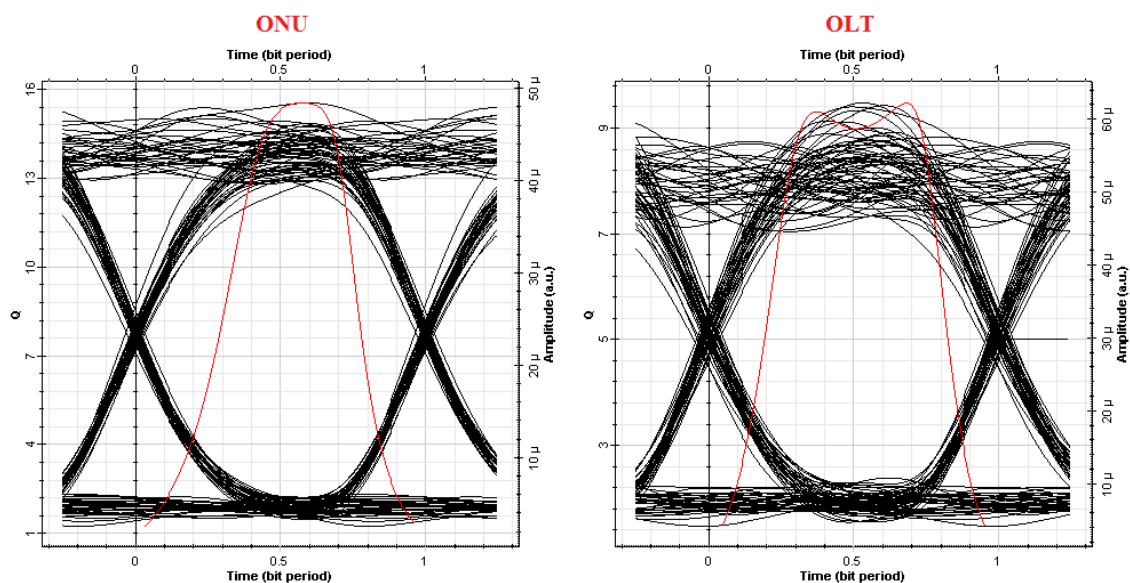


Obr. 2.9: Optické spektrum před a za zesilovačem pro směr upstream.

Kvalitativní parametry Q-faktor a BER, dosáhly po vložení zesilovacího prvku hodnot (viz Tab. č. 2.9) a jim odpovídají diagramy oka vykreslené na Obr. č. 2.10.

Parametr	Downstream	Upstream
Q-faktor [-]	16,451	9,621
BER [-]	$5,87 \cdot 10^{-60}$	$1,78 \cdot 10^{-23}$

Tab. 2.9: Naměřené hodnoty kvalitativních parametrů pro vložený zesilovací prvek.



Obr. 2.10: Diagramy oka na obou koncích přístupové sítě s vloženým zesilovacím prvkem.

Požadovaná bitová chybovost  $BER = 10^{-12}$  v jednom ze směrů byla pro navržený model s aplikovaným zesilovacím prvkem a útlumovým členem dosažena při vzdálenosti optické trasy 49 km. Při takto nastavené vzdálenosti dosáhly kvalitativní parametry hodnot (viz Tab. č. 2.10).

Parametr	Downstream	Upstream
Q-faktor [-]	7,851	7,004
BER [-]	$1,45 \cdot 10^{-21}$	$2,54 \cdot 10^{-12}$

Tab. 2.10: Naměřené hodnoty kvalitativních parametrů pro maximální dosah.

### B.1.2 Druhé umístění zesilovače

#### EDFA

Další umístění zesilovacího prvku odpovídá průběžnému zesilovači v obou směrech provozu, kdy zisk jednotlivých EDFA zesilovačů je nastaven na 20 dB.

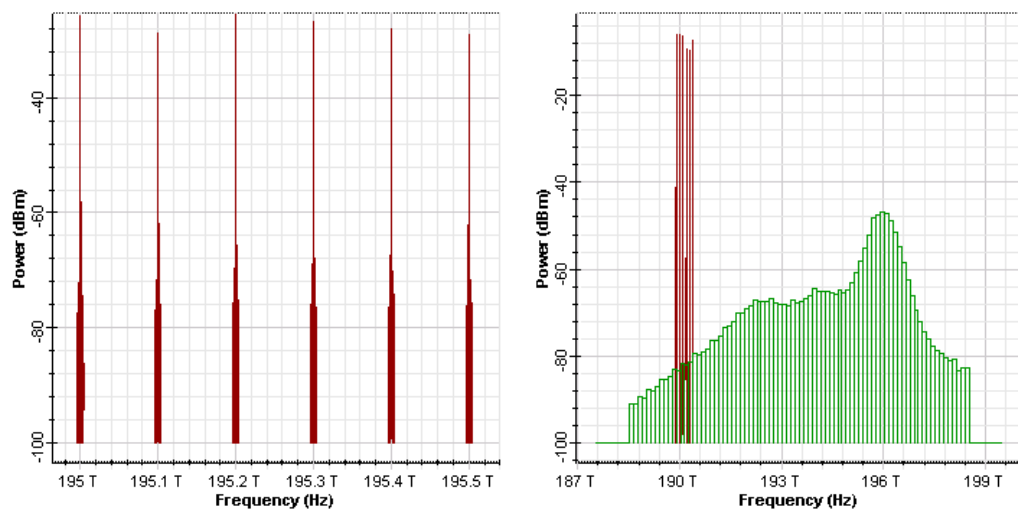
Dosažené výkonové úrovně v prvním kanále po aplikování zesilovacího prvku jsou zaznamenány v Tab. č. 2.11.

	Downstream		Upstream	
Parametr	Před zesilovačem	Za zesilovačem	Před zesilovačem	Za zesilovačem
P [dBm]	-13,91	2,598	-18,91	10,875
OSNR [dB]	86,09	42,71	81,09	30,417
Rozdíl kanálů [dBm]	0,056	2,236	0,0004	7,482

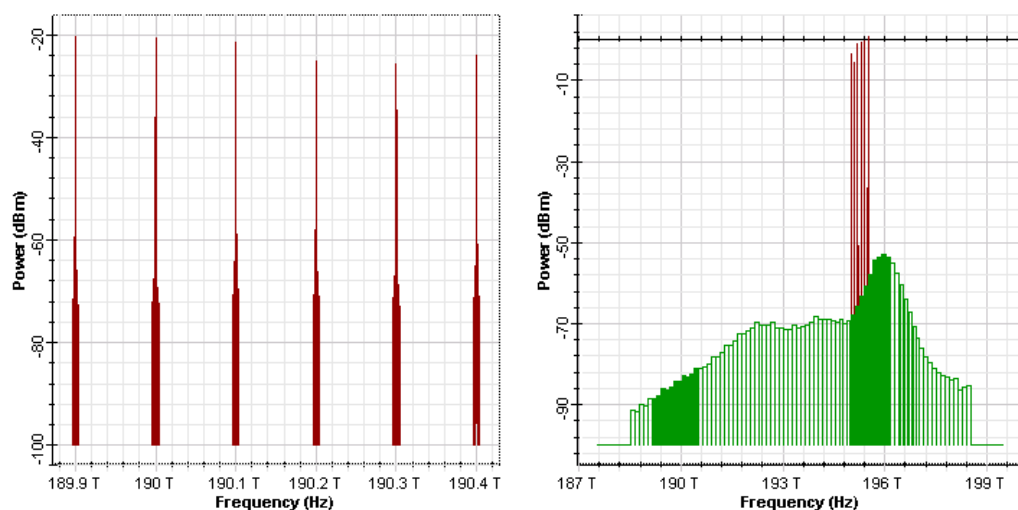
Tab. 2.11: Naměřené hodnoty parametrů pro vložený zesilovací prvek.

Navržený zesilovací prvek dodal optickému signálu v prvním kanálu zisk v downstreamu 11,31 dB a v upstreamu 8,04 dB.

Optické spektrum s přídavným šumem před a za zesilovačem je možné vidět na Obr. č. 2.11; Obr. č. 2.12.



Obr. 2.11: Optické spektrum před a za zesilovačem pro směr downstream.

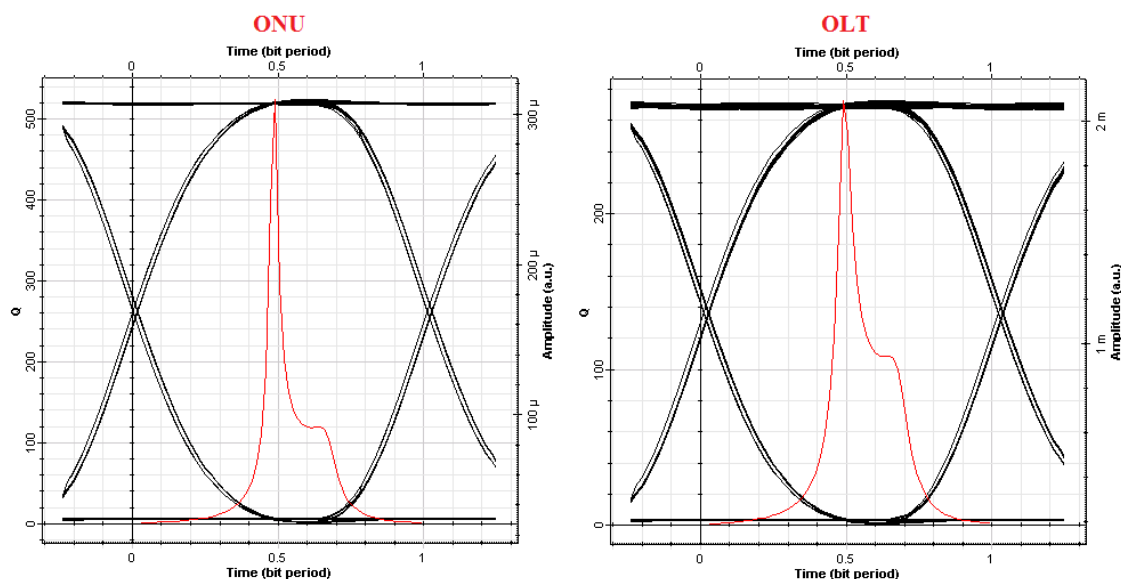


Obr. 2.12: Optické spektrum před a za zesilovačem pro směr upstream.

Kvalitativní parametry Q-faktor a BER, dosáhly po vložení zesilovacího prvku hodnot (viz Tab. č. 2.12) a jim odpovídají diagramy oka vykreslené na Obr. č. 2.13.

Parametr	Downstream	Upstream
Q-faktor [-]	523,933	272,558
BER [-]	0	0

Tab. 2.12: Naměřené hodnoty kvalitativních parametrů pro vložený zesilovací prvek.



Obr. 2.13: Diagramy oka na obou koncích přístupové sítě s vloženým zesilovacím prvkem.

Požadovaná bitová chybovost  $BER = 10^{-12}$  v jednom ze směrů byla pro navržený model s aplikovaným zesilovacím prvkem dosažena při vzdálenosti optické trasy 126 km. Při takto nastavené vzdálenosti dosáhly kvalitativní parametry hodnot (viz Tab. č. 2.13).

Parametr	Downstream	Upstream
Q-faktor [-]	6,734	39,89
BER [-]	$8,26 \cdot 10^{-12}$	0

Tab. 2.13: Naměřené hodnoty kvalitativních parametrů pro maximální dosah.

### RAMANŮV ZESILOVAČ

V dalším scénáři pro druhé umístění zesilovače se do trasy místo EDFA implementoval Ramanův zesilovač, jehož model je blíže specifikován v podkapitole 6.2.1.

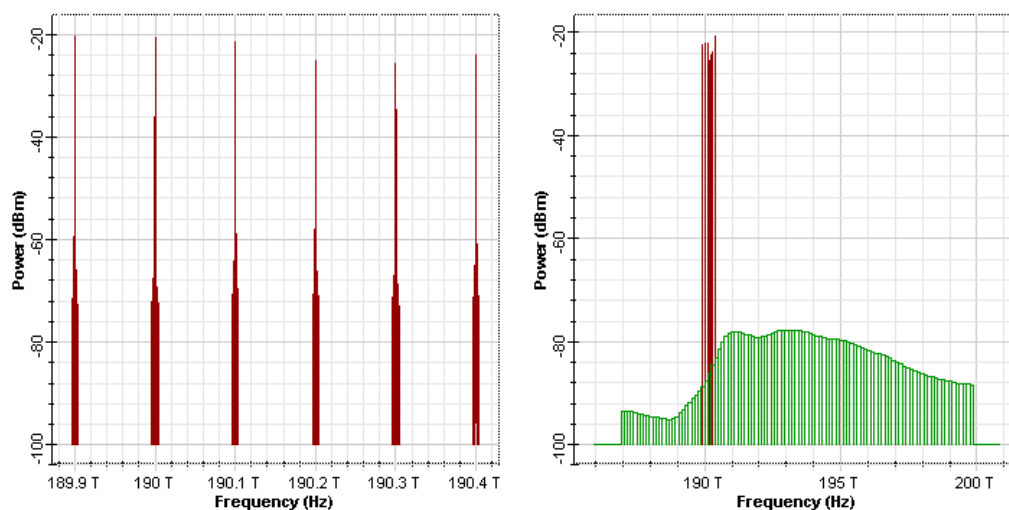
Dosažené hodnoty výkonových úrovní v prvním kanále po aplikování zesilovacího prvku jsou zaznamenány v Tab. č. 2.14.

	Downstream		Upstream	
Parametr	Před zesilovačem	Za zesilovačem	Před zesilovačem	Za zesilovačem
P [dBm]	-13,91	-10,539	-18,91	-12,093
OSNR [dB]	86,09	31,384	81,09	27,461
Rozdíl kanálů [dBm]	0,056	5,446	0,0004	0,948

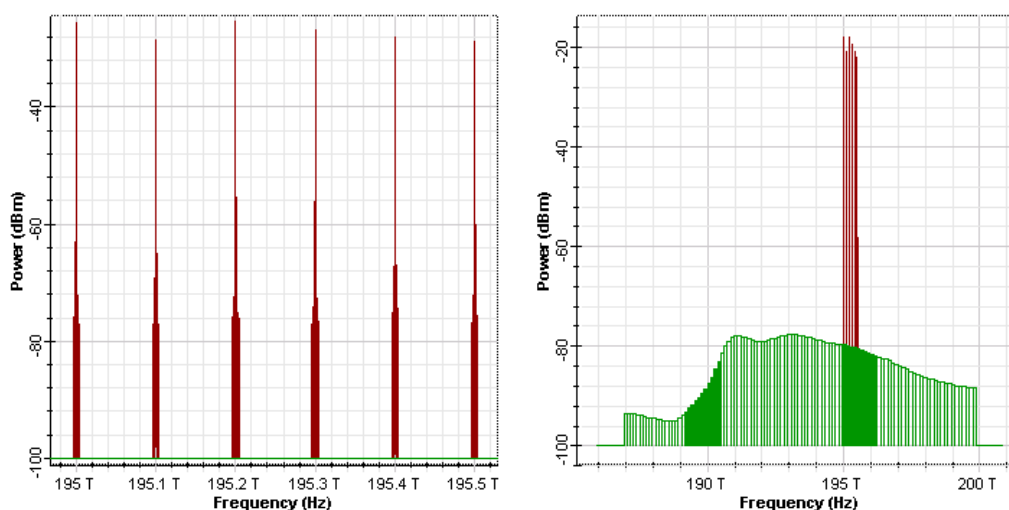
Tab. 2.14: Naměřené hodnoty parametrů pro vložený zesilovací prvek.

Navržený zesilovací prvek dodal optickému signálu v prvním kanálu zisk v downstreamu 3,37 dB a v upstreamu 6,82 dB.

Optické spektrum s přídavným šumem před a za zesilovačem je možné vidět na Obr. č. 2.14; Obr. č. 2.15.



Obr. 2.14: Optické spektrum před a za zesilovačem pro směr downstream.

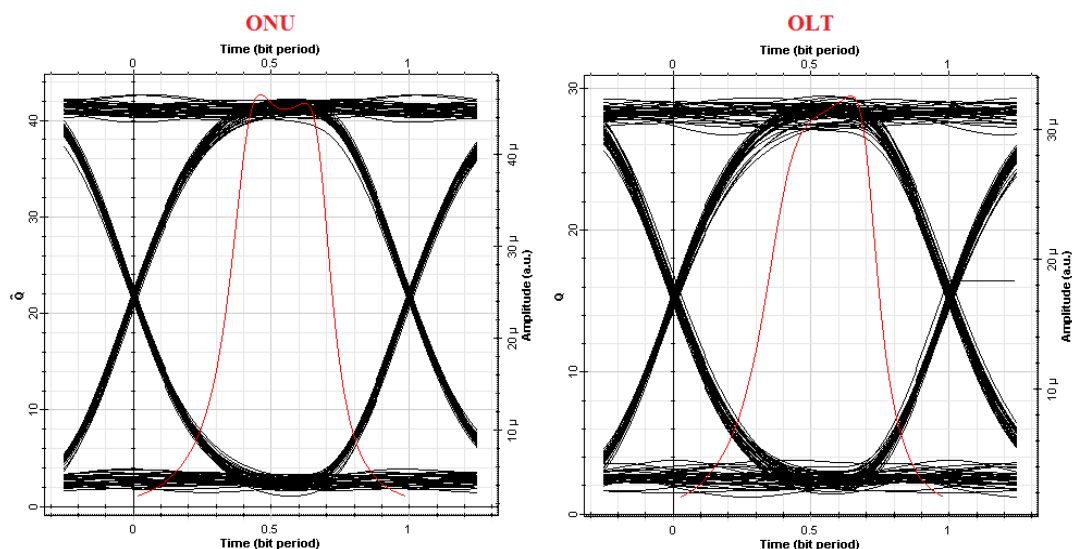


Obr. 2.15: Optické spektrum před a za zesilovačem pro směr upstream.

Kvalitativní parametry Q-faktor a BER, dosáhly po vložení zesilovacího prvku hodnot (viz Tab. č. 2.15) a jim odpovídají diagramy oka vykreslené na Obr. č. 2.16.

Parametr	Downstream	Upstream
Q-faktor [-]	45,462	31,693
BER [-]	0	$9,76 \cdot 10^{-221}$

Tab. 2.15: Naměřené hodnoty kvalitativních parametrů pro vložený zesilovací prvek.



Obr. 2.16: Diagramy oka na obou koncích přístupové sítě s vloženým zesilovacím prvkem.

Požadovaná bitová chybovost  $BER = 10^{-12}$  v jednom ze směrů byla pro navržený model s aplikovaným zesilovacím prvkem dosažena při vzdálenosti optické trasy 69 km. Při takto nastavené vzdálenosti dosáhly kvalitativní parametry hodnot (viz Tab. č. 2.16).

Parametr	Downstream	Upstream
Q-faktor [-]	8,457	6,987
BER [-]	$1,38 \cdot 10^{-17}$	$4,87 \cdot 10^{-12}$

Tab. 2.16: Naměřené hodnoty kvalitativních parametrů pro maximální dosah.

## SOA

V posledním scénáři pro druhé umístění zesilovače se do trasy implementoval SOA zesilovač, jehož model je blíže popsán v podkapitole 6.2.1. Ovšem tento zesilovač optický signál vůbec nezesiloval z důvodu velkých výkonových úrovní na jeho vstupu (neustále pracoval v saturačním režimu). Bylo tedy nutné před něj umístit optický útlumový článek, který signál před vstupem do zesilovače utlumil na požadované hodnoty. V downstreamu měl útlumový člen hodnotu 15 dB v upstreamu pak 10 dB.

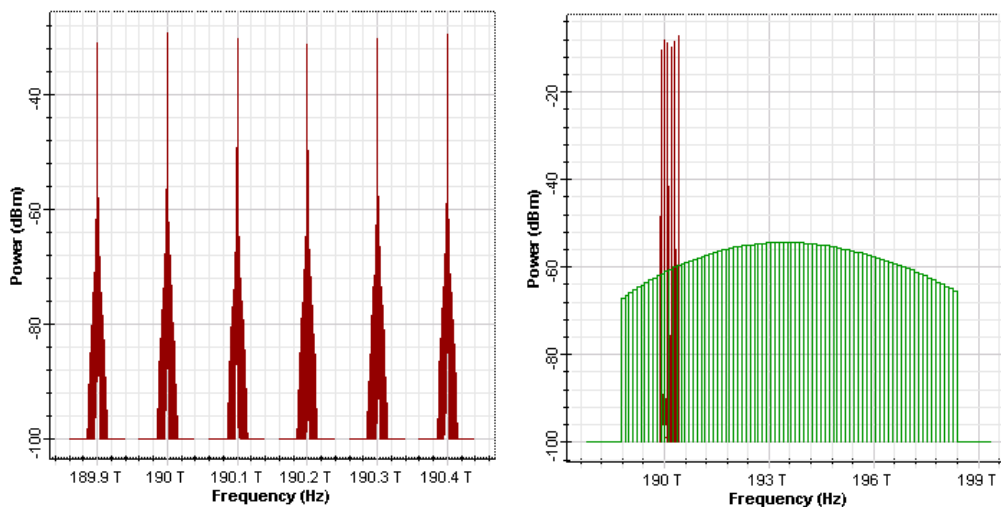
Dosažené hodnoty výkonových úrovní v prvním kanále po aplikování zesilovacího prvku s útlumovým členem jsou zaznamenány v Tab. č. 2.17.

	Downstream		Upstream	
Parametr	Před zesilovačem	Za zesilovačem	Před zesilovačem	Za zesilovačem
P [dBm]	-26,91	-2,54	-18,91	-3,561
OSNR [dB]	73,476	26,721	81,09	20,621
Rozdíl kanálů [dBm]	0,056	1,878	0,0004	1,348

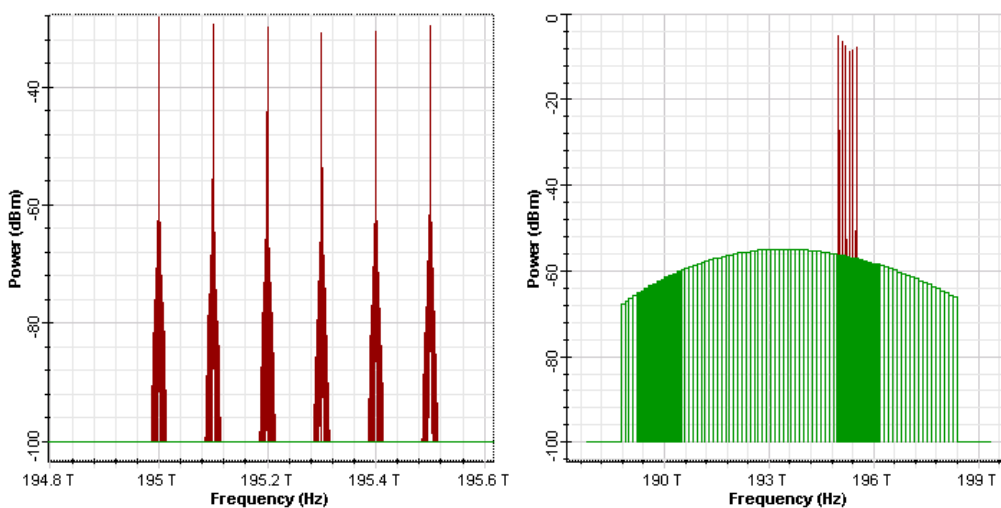
Tab. 2.17: Naměřené hodnoty parametrů pro vložený zesilovací prvek.

Navržený zesilovací prvek dodal optickému signálu v prvním kanálu zisk v downstreamu 24,37 dB a v upstreamu 15,35 dB.

Optické spektrum s přídavným šumem před a za zesilovačem je vidět na Obr. č. 2.17; Obr. č. 2.18.



Obr. 2.17: Optické spektrum před a za zesilovačem pro směr downstream.

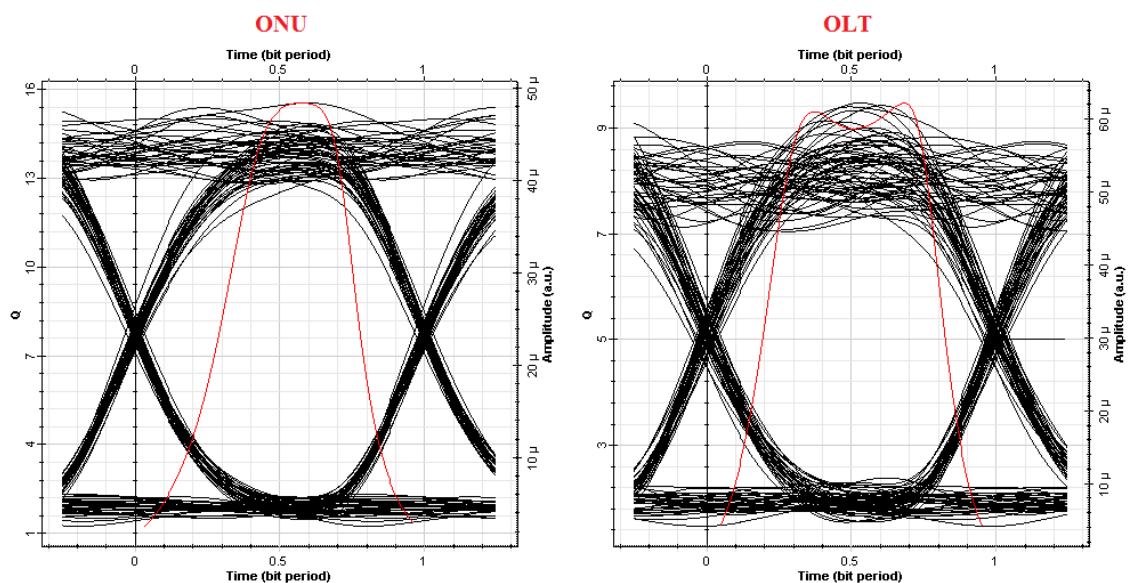


Obr. 2.18: Optické spektrum před a za zesilovačem pro směr upstream.

Kvalitativní parametry Q-faktor a BER, dosáhly po vložení zesilovacího prvku hodnot (viz Tab. č. 2.18) a jim odpovídají diagramy oka vykreslené na Obr. č. 2.19.

Parametr	Downstream	Upstream
Q-faktor [-]	14,57	17,092
BER [-]	$6,54 \cdot 10^{-45}$	$7,32 \cdot 10^{-68}$

Tab. 2.18: Naměřené hodnoty kvalitativních parametrů pro vložený zesilovací prvek.



Obr. 2.19: Diagramy oka na obou koncích přístupové sítě s vloženým zesilovacím prvkem.

Požadovaná bitová chybovost  $BER = 10^{-12}$  v jednom ze směrů byla pro navržený model s aplikovaným zesilovacím prvkem a útlumovým členem dosažena při vzdálenosti optické trasy 88 km. Při takto nastavené vzdálenosti dosáhly kvalitativní parametry hodnot (viz Tab. č. 2.19).

Parametr	Downstream	Upstream
Q-faktor [-]	7,982	6,945
BER [-]	$6,41 \cdot 10^{-16}$	$2,58 \cdot 10^{-12}$

Tab. 2.19: Naměřené hodnoty kvalitativních parametrů pro maximální dosah.

### B.1.3 Třetí umístění zesilovače

#### EDFA

Poslední umístění zesilovacího prvku do optické trasy odpovídá předzesilovači ve směru downstream s nastaveným ziskem 20 dB a výkonovému zesilovači ve směru upstream s nastavenou hodnotou zisku 10 dB.

Dosažené výkonové úrovně v prvním kanále po aplikování zesilovacího prvku jsou zaznamenány v Tab. č. 2.20.

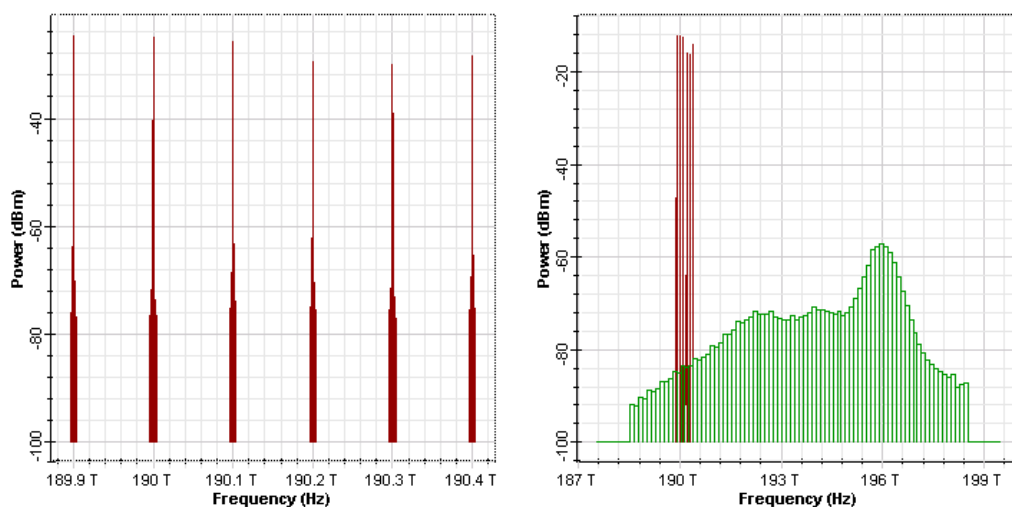
	Downstream		Upstream	
Parametr	Před zesilovačem	Za zesilovačem	Před zesilovačem	Za zesilovačem
P [dBm]	-18,23	-3,945	-14,589	4,469
OSNR [dB]	81,77	38,354	73,568	35,751
Rozdíl kanálů [dBm]	0,056	1,793	0,0004	6,699

Tab. 2.20: Naměřené hodnoty parametrů pro vložený zesilovací prvek.

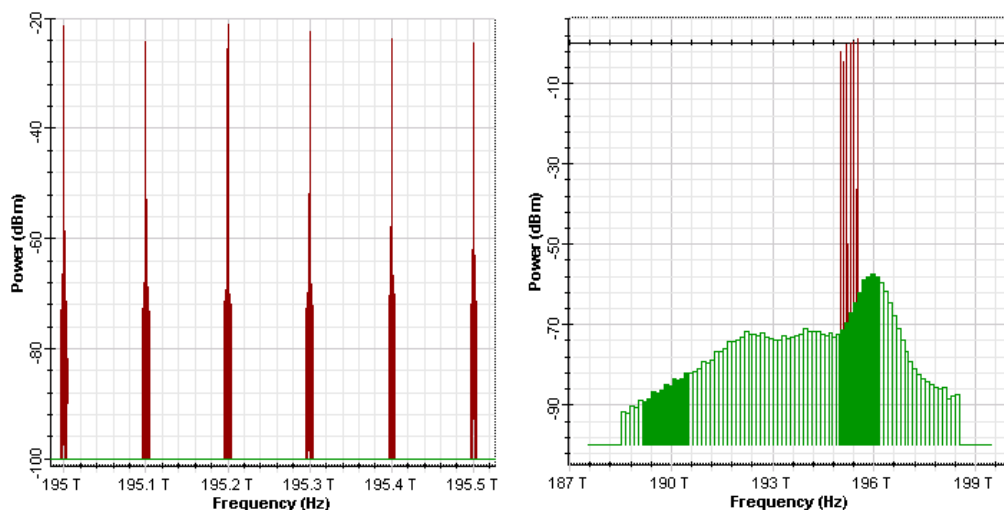


Navržený zesilovací prvek dodal optickému signálu v prvním kanálu zisk v downstreamu 14,29 dB a v upstreamu 19,06 dB.

Optické spektrum s přídavným šumem před a za zesilovačem je vidět na Obr. č. 2.20; Obr. č. 2.21.



Obr. 2.20: Optické spektrum před a za zesilovačem pro směr downstream.

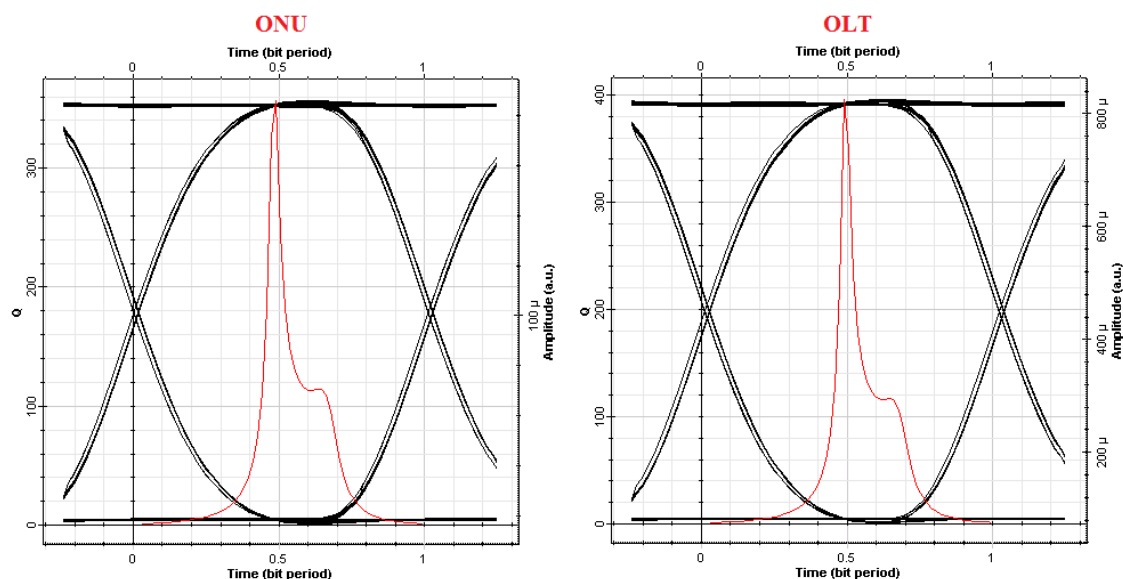


Obr. 2.21: Optické spektrum před a za zesilovačem pro směr upstream.

Kvalitativní parametry Q-faktor a BER, dosáhly po vložení zesilovacího prvku hodnot (viz Tab. č. 2.21) a jim odpovídají diagramy oka vykreslené na Obr. č. 2.22.

Parametr	Downstream	Upstream
Q-faktor [-]	356,64	395,636
BER [-]	0	0

Tab. 2.21: Naměřené hodnoty kvalitativních parametrů pro vložený zesilovací prvek.



Obr. 2.22: Diagramy oka na obou koncích přístupové sítě s vloženým zesilovacím prvkem.

Požadovaná bitová chybovost  $BER = 10^{-12}$  v jednom ze směrů byla pro navržený model s aplikovaným zesilovacím prvkem dosažena při vzdálenosti optické trasy 112 km. Při takto nastavené vzdálenosti dosáhly kvalitativní parametry hodnot (viz Tab. č. 2.22).

Parametr	Downstream	Upstream
Q-faktor [-]	6,924	35,969
BER [-]	$2,16 \cdot 10^{-12}$	$1,28 \cdot 10^{-283}$

Tab. 2.22: Naměřené hodnoty kvalitativních parametrů pro maximální dosah.

### RAMANŮV ZESILOVAČ

V dalším scénáři pro třetí umístění zesilovače se do trasy místo EDFA implementoval Ramanův zesilovač, jenž je popsán v podkapitole 6.2.1.

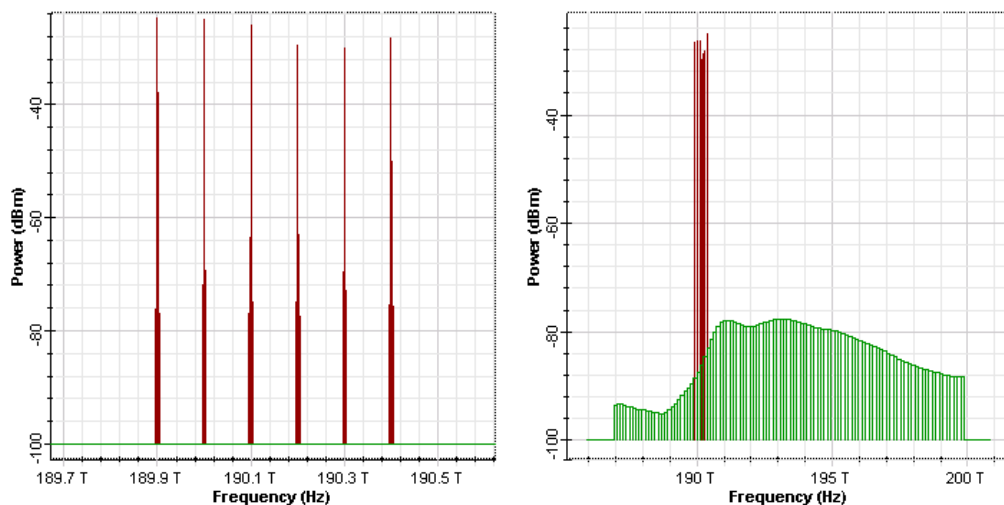
Dosažené hodnoty výkonových úrovní v prvním kanále po aplikování zesilovacího prvku jsou zaznamenány v Tab. č. 2.23.

	Downstream		Upstream	
Parametr	Před zesilovačem	Za zesilovačem	Před zesilovačem	Za zesilovačem
P [dBm]	-18,23	-14,852	-14,593	-7,813
OSNR [dB]	81,77	27,066	85,407	31,773
Rozdíl kanálů [dBm]	0,056	5,45	0,0004	0,946

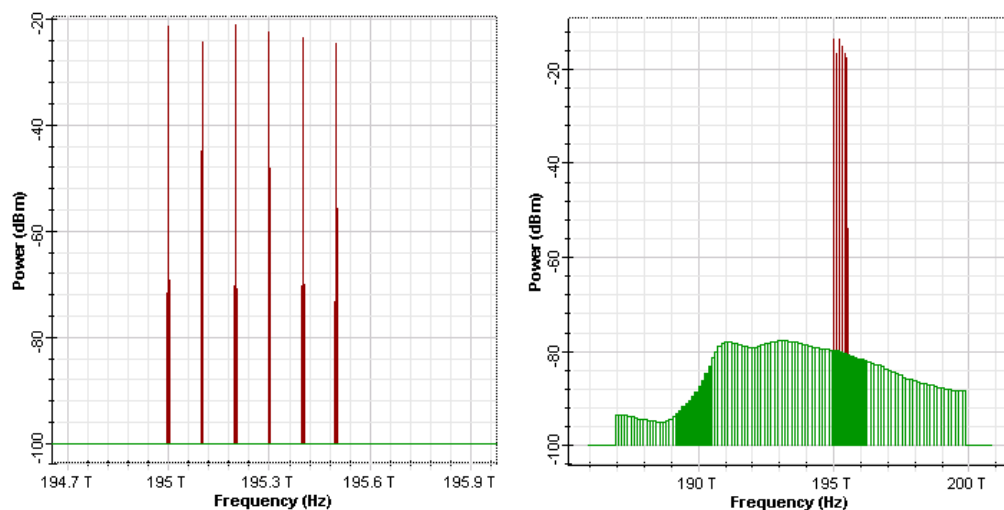
Tab. 2.23: Naměřené hodnoty parametrů pro vložený zesilovací prvek.

Navržený zesilovací prvek dodal optickému signálu zisk v downstreamu 3,38 dB a v upstreamu 6,78 dB.

Optické spektrum s přidavným šumem před a za zesilovačem je vidět na Obr. č. 2.23; Obr. č. 2.24.



Obr. 2.23: Optické spektrum před a za zesilovačem pro směr downstream.

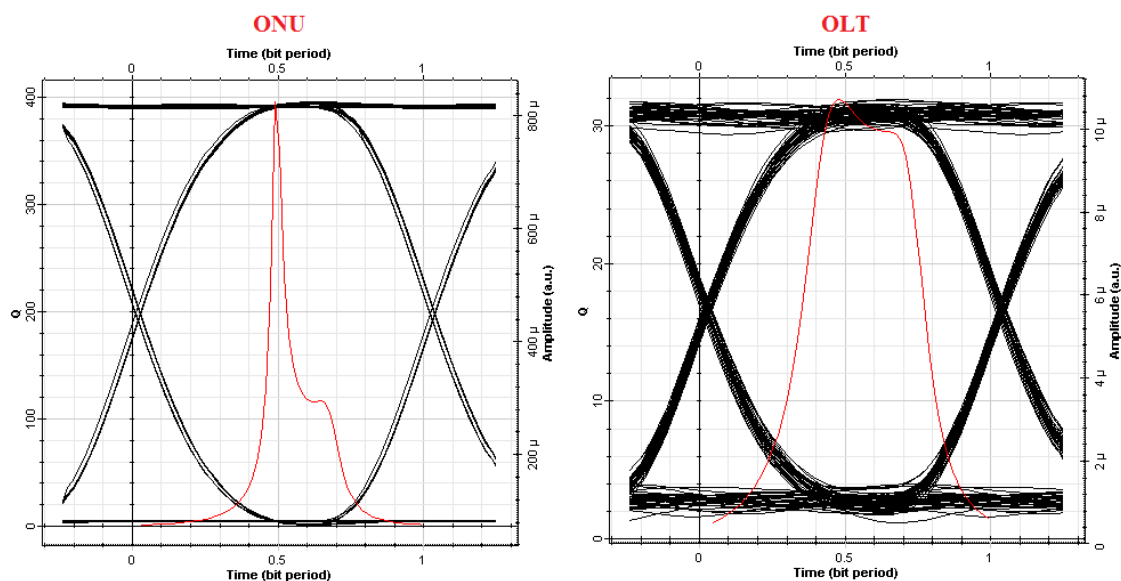


Obr. 2.24: Optické spektrum před a za zesilovačem pro směr upstream.

Kvalitativní parametry Q-faktor a BER, dosáhly po vložení zesilovacího prvku hodnot (viz Tab. č. 2.24) a jim odpovídají diagramy oka vykreslené na Obr. č. 2.25.

Parametr	Downstream	Upstream
Q-faktor [-]	43,968	31,924
BER [-]	0	$6,26 \cdot 10^{-224}$

Tab. 2.24: Naměřené hodnoty kvalitativních parametrů pro vložený zesilovací prvek.



Obr. 2.25: Diagramy oka na obou koncích přístupové sítě s vloženým zesilovacím prvkem.

Požadovaná bitová chybovost  $BER = 10^{-12}$  v jednom ze směrů byla pro navržený model s aplikovaným zesilovacím prvkem dosažena při vzdálenosti optické trasy 64 km. Při takto nastavené vzdálenosti dosáhly kvalitativní parametry hodnot (viz Tab. č. 2.25).

Parametr	Downstream	Upstream
Q-faktor [-]	10,232	6,949
BER [-]	$7,15 \cdot 10^{-25}$	$4,02 \cdot 10^{-12}$

Tab. 2.25: Naměřené hodnoty kvalitativních parametrů pro maximální dosah.

### SOA

V posledním scénáři pro třetí umístění zesilovače se do trasy implementoval SOA zesilovač, jenž je popsán v podkapitole 6.2.1. Ovšem tento zesilovač optický signál vůbec nezesiloval z důvodu velkých výkonových úrovní na jeho vstupu (neustále pracoval v saturačním režimu). Bylo tedy nutné před něj umístit optický útlumový článek, který signál před vstupem do zesilovače utlumil. V downstreamu měl útlumový člen hodnotu 15 dB v upstreamu pak 15 dB.

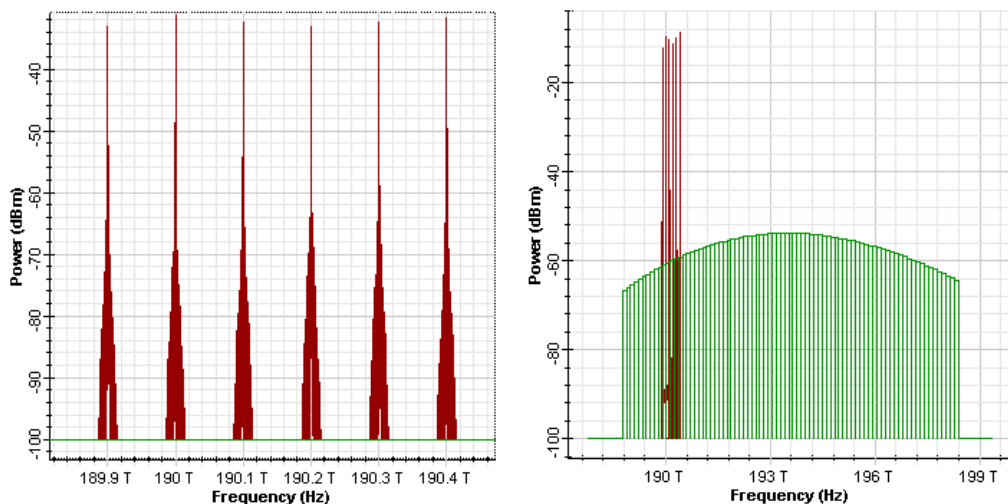
Dosažené hodnoty výkonových úrovní v prvním kanále po aplikování zesilovacího prvku s útlumovým členem jsou zaznamenány v Tab. č. 2.26.

	Downstream		Upstream	
Parametr	Před zesilovačem	Za zesilovačem	Před zesilovačem	Za zesilovačem
P [dBm]	-33,23	-4,981	-29,593	-6,983
OSNR [dB]	71,634	21,596	70,396	19,023
Rozdíl kanálů [dBm]	0,056	2,567	0,0002	1,67

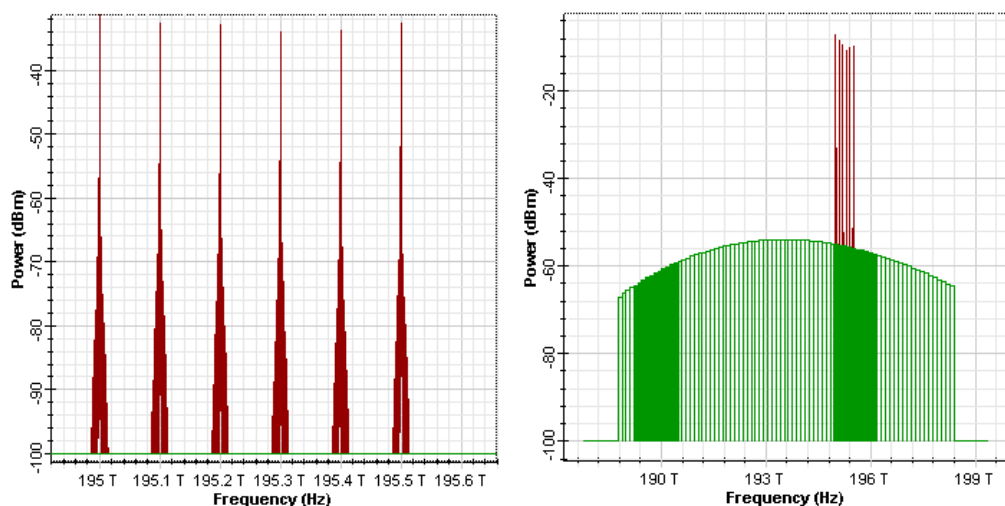
Tab. 2.26: Naměřené hodnoty parametrů pro vložený zesilovací prvek.

Navržený zesilovací prvek dodal optickému signálu zisk v downstreamu 28,25 dB a v upstreamu 22,61 dB.

Optické spektrum s přídavným šumem před a za zesilovačem je vidět na Obr. č. 2.26; Obr. č. 2.27.



Obr. 2.26: Optické spektrum před a za zesilovačem pro směr downstream.

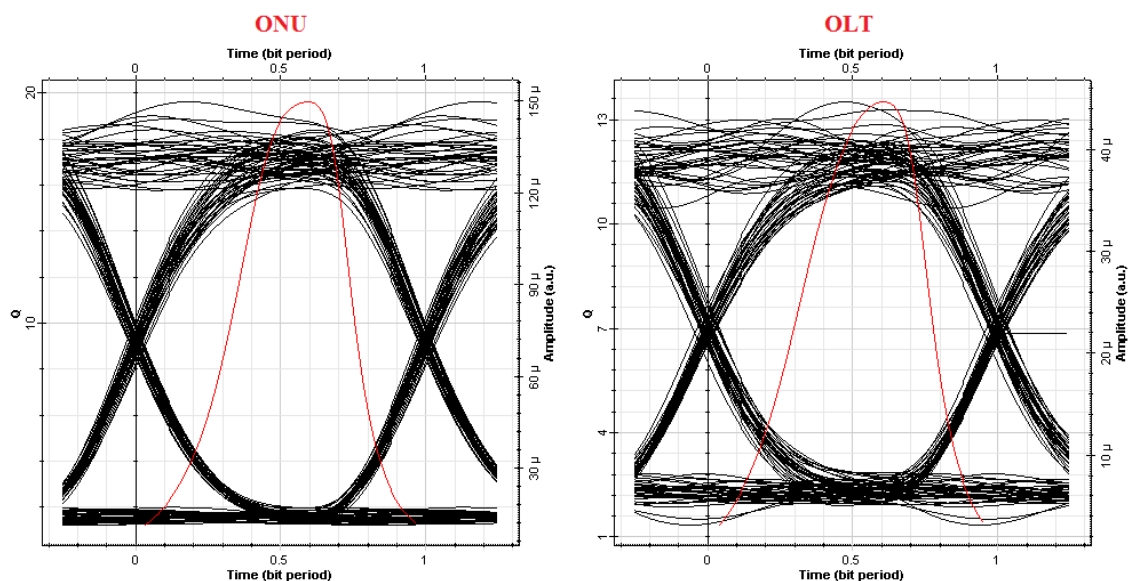


Obr. 2.27: Optické spektrum před a za zesilovačem pro směr upstream.

Kvalitativní parametry Q-faktor a BER, dosáhly po vložení zesilovacího prvku hodnot (viz Tab. č. 2.27) a jim odpovídají diagramy oka vykreslené na Obr. č. 2.28.

Parametr	Downstream	Upstream
Q-faktor [-]	20,682	14,095
BER [-]	$3,78 \cdot 10^{-90}$	$7,89 \cdot 10^{-51}$

Tab. 2.27: Naměřené hodnoty kvalitativních parametrů pro vložený zesilovací prvek.



Obr. 2.28: Diagramy oka na obou koncích přístupové sítě s vloženým zesilovacím prvkem.

Požadovaná bitová chybovost  $BER = 10^{-12}$  v jednom ze směrů byla pro navržený model s aplikovaným zesilovacím prvkem a útlumovým členem dosažena při vzdálenosti optické trasy 50 km. Při takto nastavené vzdálenosti dosáhly kvalitativní parametry hodnot (viz Tab. č. 2.28).

Parametr	Downstream	Upstream
Q-faktor [-]	20,512	6,825
BER [-]	$5,78 \cdot 10^{-88}$	$3,56 \cdot 10^{-12}$

Tab. 2.28: Naměřené hodnoty kvalitativních parametrů pro maximální dosah.

## B.2 Výsledky simulací pro přenosovou rychlost 2,5 Gbit/s

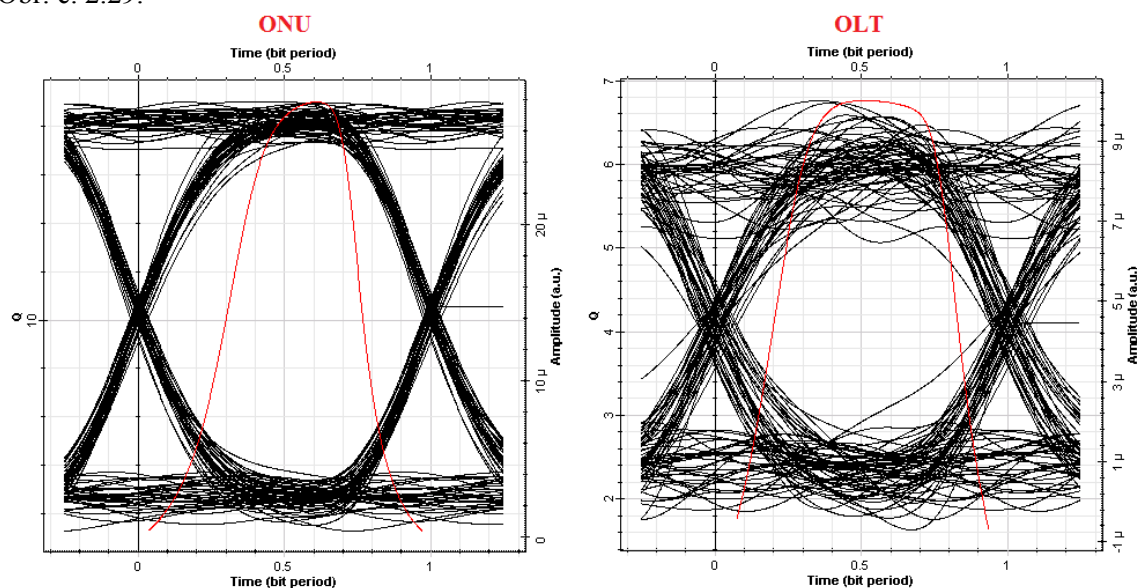
V této podkapitole se nacházejí naměřené výsledky pro přenosovou rychlost 2,5 Gbit/s a pro tři různá umístění zesilovacího prvku. První umístění je umístění na začátku optické trasy, což odpovídá výkonovému zesilovači ve směru downstream a předzesilovači ve směru upstream. Druhé umístění se nachází někde v optické trase, kdy zesilovací prvek má v obou směrech funkci průběžného zesilovače. Poslední umístění odpovídá předzesilovači ve směru downstream a výkonovému zesilovači ve směru upstream.

Požadovaná bitová chybovost  $BER = 10^{-12}$  v jednom ze směrů navržené WDM-PON topologie byla pro přenosovou rychlost 2,5 Gbit/s a bez aplikovaného zesilovacího prvku dosažena při vzdálenosti optické trasy 11,5 km. Zjištěné hodnoty Q – faktoru a BER pro pospanou situaci jsou zaznamenány v Tab. č. 2.29.

Parametr	Downstream	Upstream
Q-faktor [-]	19,019	6,758
BER [-]	$5,97 \cdot 10^{-81}$	$6,89 \cdot 10^{-12}$

Tab. 2.29: Naměřené hodnoty kvalitativních parametrů pro maximální dosah.

Těmto hodnotám kvalitativních parametrů odpovídají diagramy oka znázorněné na Obr. č. 2.29.



Obr. 2.29: Diagramy oka na obou koncích přístupové sítě.

### B.2.1 První umístění zesilovače

#### EDFA

Jak již bylo zmíněno v úvodu podkapitoly, první umístění zesilovacího prvku odpovídá výkonovému zesilovači ve směru downstream s nastaveným ziskem 10 dB a předzesilovači ve směru upstream s nastavenou hodnotou zisku 20 dB.

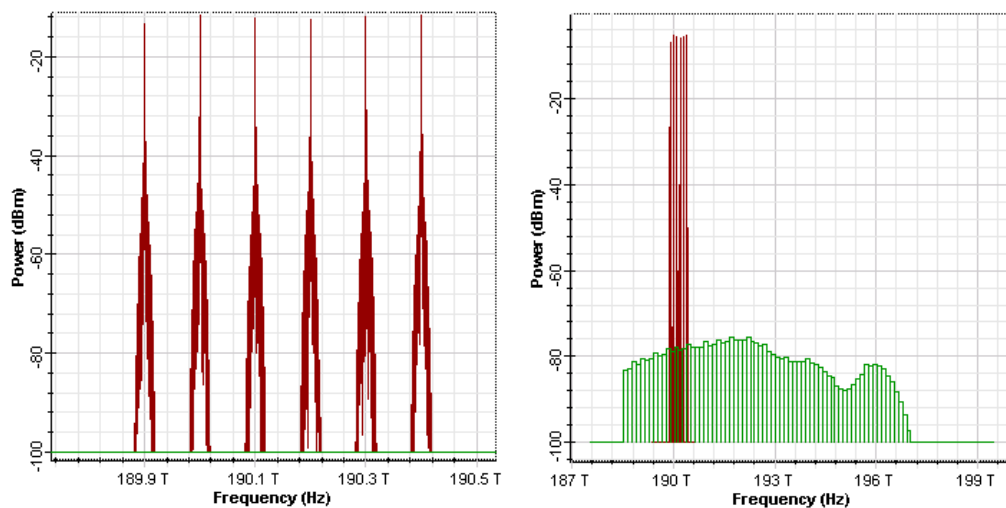
Dosažené výkonové úrovně v prvním kanále po aplikování zesilovacího prvku jsou zaznamenány v Tab. č. 2.30.

	Downstream		Upstream	
Parametr	Před zesilovačem	Za zesilovačem	Před zesilovačem	Za zesilovačem
P [dBm]	-9,621	-3,265	-17,381	3,683
OSNR [dB]	90,379	46,997	82,619	31,825
Rozdíl kanálů [dBm]	0,056	0,209	0,0005	5,697

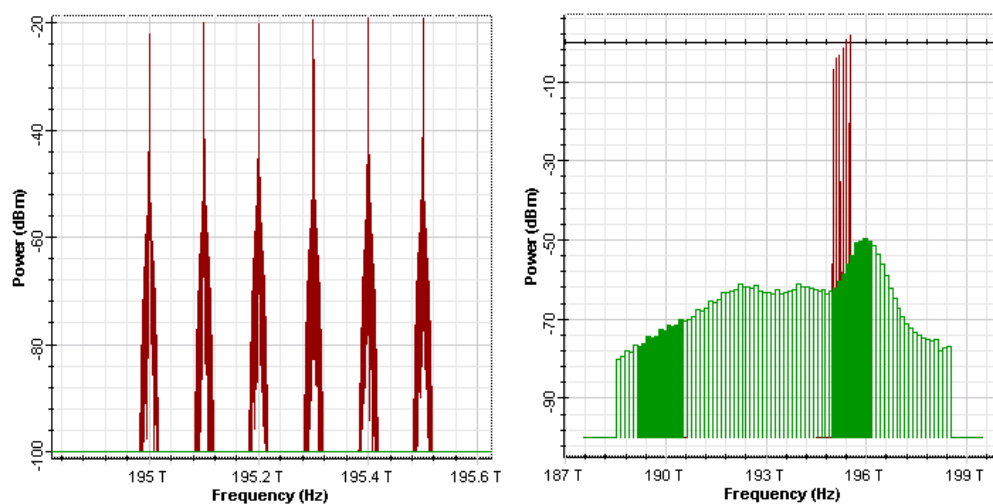
Tab. 2.30: Naměřené hodnoty parametrů pro vložený zesilovací prvek.

Navržený zesilovací prvek dodal optickému signálu v prvním kanálu WDM-PON sítě zisk v downstreamu 6,36 dB a v upstreamu 21,06 dB.

Optické spektrum s přídavným šumem před a za zesilovačem je možné vidět na Obr. č. 2.30; Obr. č. 2.31.



Obr. 2.30: Optické spektrum před a za zesilovačem pro směr downstream.



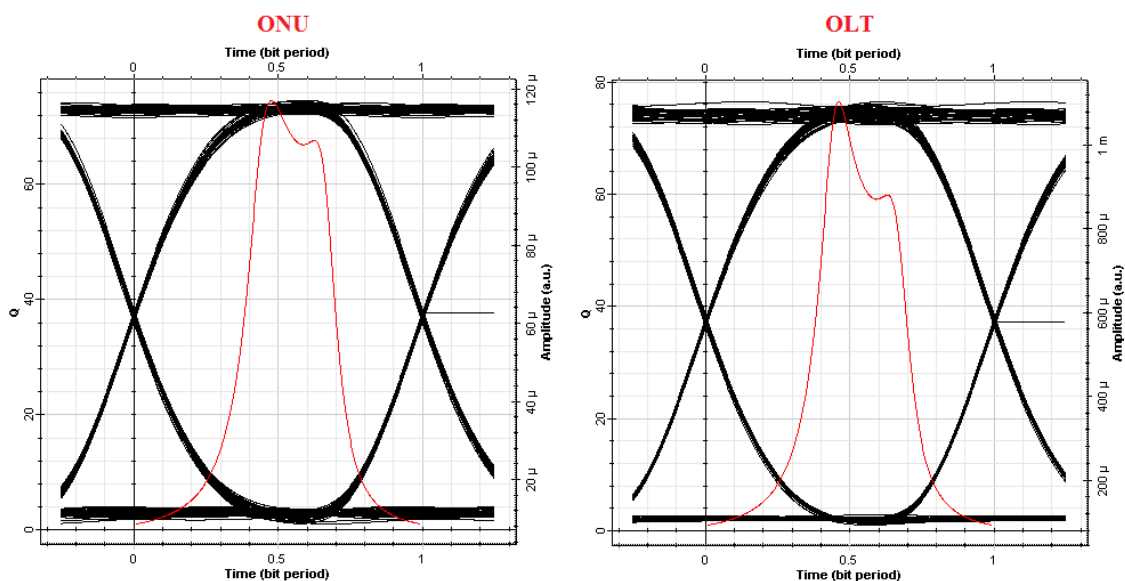
Obr. 2.31: Optické spektrum před a za zesilovačem pro směr upstream.

Kvalitativní parametry Q-faktor a BER, dosáhly po vložení zesilovacího prvku hodnot (viz Tab. č. 2.31) a jim odpovídají diagramy oka vykreslené na Obr. č. 2.32.

Parametr	Downstream	Upstream
Q-faktor [-]	74,535	76,459
BER [-]	0	0

Tab. 2.31: Naměřené hodnoty kvalitativních parametrů pro vložený zesilovací prvek.





Obr. 2.32: Diagramy oka na obou koncích přístupové sítě s vloženým zesilovacím prvkem.

Požadovaná bitová chybovost  $BER = 10^{-12}$  v jednom ze směrů byla pro navržený model s aplikovaným zesilovacím prvkem dosažena při vzdálenosti optické trasy 56 km. Při takto nastavené vzdálenosti dosáhly kvalitativní parametry hodnot (viz Tab. č. 2.32).

Parametr	Downstream	Upstream
Q-faktor [-]	7,041	22,138
BER [-]	$1,03 \cdot 10^{-12}$	$5,98 \cdot 10^{-109}$

Tab. 2.32: Naměřené hodnoty kvalitativních parametrů pro maximální dosah.

### RAMANŮV ZESILOVAČ

V dalším scénáři pro první umístění zesilovače se do trasy místo EDFA implementoval Ramanův zesilovač, jehož model je blíže specifikován v podkapitole 6.2.1.

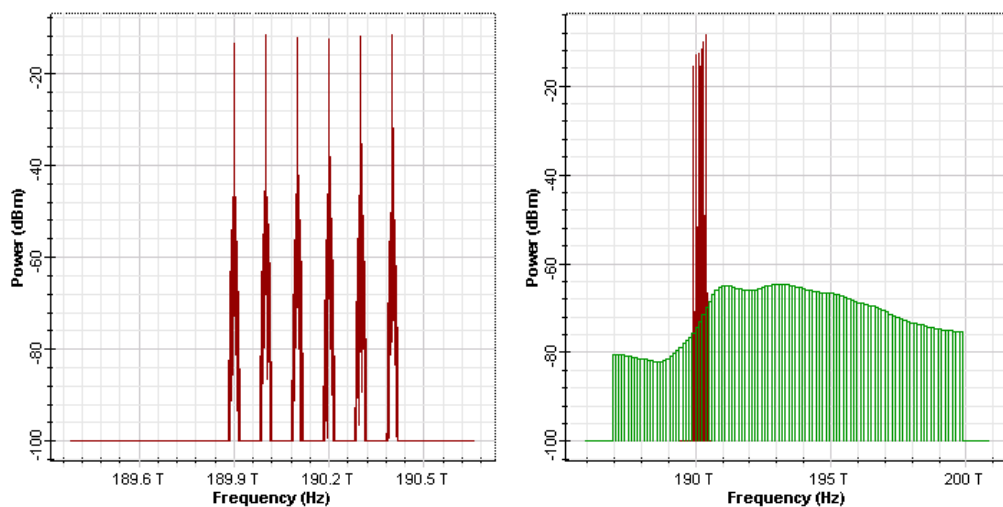
Dosažené hodnoty výkonových úrovní v prvním kanálu po aplikování zesilovacího prvku jsou zaznamenány v Tab. č. 2.33.

Parametr	Downstream		Upstream	
	Před zesilovačem	Za zesilovačem	Před zesilovačem	Za zesilovačem
P [dBm]	-9,621	-6,271	-17,381	-10,575
OSNR [dB]	90,379	35,671	82,619	28,987
Rozdíl kanálů [dBm]	0,056	5,446	0,0005	0,949

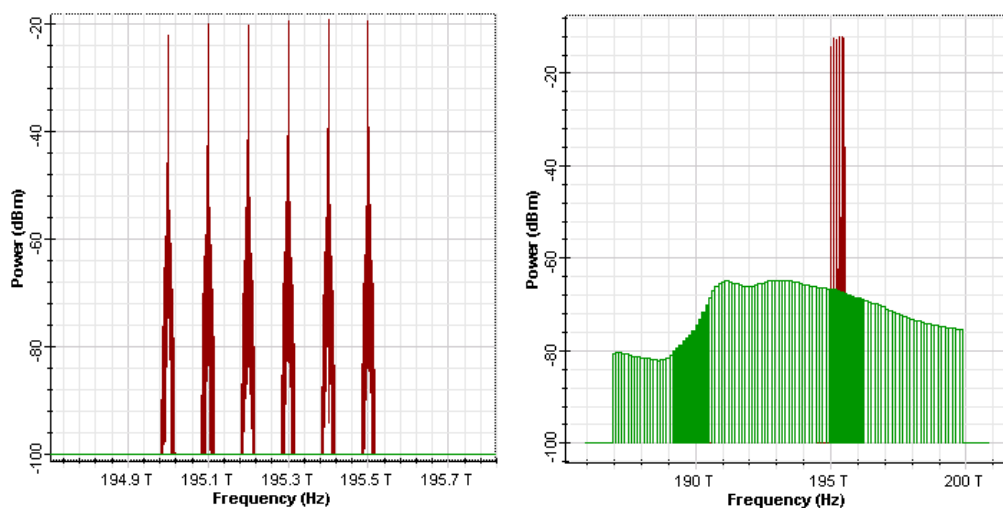
Tab. 2.33: Naměřené hodnoty parametrů pro vložený zesilovací prvek.

Navržený zesilovací prvek dodal optickému signálu v prvním kanálu zisk v downstreamu 3,35 dB a v upstreamu 6,81 dB.

Optické spektrum s přídavným šumem před a za zesilovačem je možné vidět na Obr. č. 2.33; Obr. č. 2.34.



Obr. 2.33: Optické spektrum před a za zesilovačem pro směr downstream.

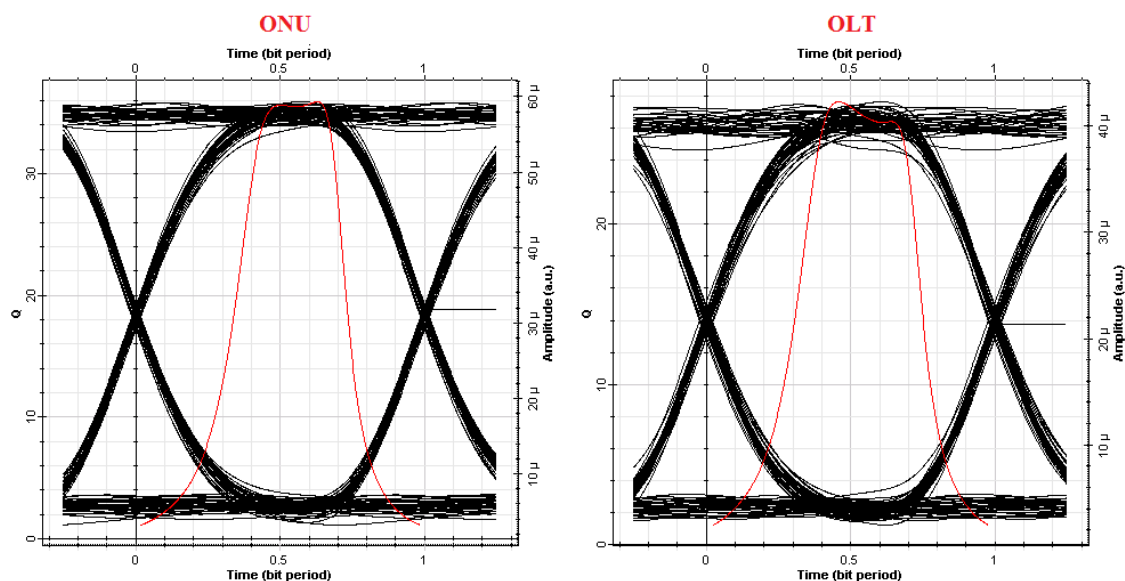


Obr. 2.34: Optické spektrum před a za zesilovačem pro směr upstream.

Kvalitativní parametry Q-faktor a BER, dosáhly po vložení zesilovacího prvku hodnot (viz Tab. č. 2.34) a jim odpovídají diagramy oka vykreslené na Obr. č. 2.35.

Parametr	Downstream	Upstream
Q-faktor [-]	35,912	27,645
BER [-]	$1,01 \cdot 10^{-282}$	$1,57 \cdot 10^{-168}$

Tab. 2.34: Naměřené hodnoty kvalitativních parametrů pro vložený zesilovací prvek.



Obr. 2.35: Diagramy oka na obou koncích přístupové sítě s vloženým zesilovacím prvkem.

Požadovaná bitová chybovost  $BER = 10^{-12}$  v jednom ze směrů byla pro navrhnutý model s aplikovaným zesilovacím prvkem dosažena při vzdálenosti optické trasy 38 km. Při takto nastavené vzdálenosti dosáhly kvalitativní parametry hodnot (viz Tab. č. 2.35).

Parametr	Downstream	Upstream
Q-faktor [-]	8,362	7,012
BER [-]	$3,09 \cdot 10^{-17}$	$6,89 \cdot 10^{-12}$

Tab. 2.35: Naměřené hodnoty kvalitativních parametrů pro maximální dosah.

### SOA

V posledním scénáři pro první umístění zesilovače se do trasy implementoval SOA zesilovač, jehož model je popsán v podkapitole 6.2.1. Ovšem tento zesilovač optický signál vůbec nezesiloval z důvodu velkých výkonových úrovní na jeho vstupu (neustále pracoval v saturačním režimu). Bylo tedy nutné před něj umístit optický útlumový článek, který signál před vstupem do zesilovače utlumil. V downstreamu měl útlumový člen hodnotu 20 dB v upstreamu pak 15 dB.

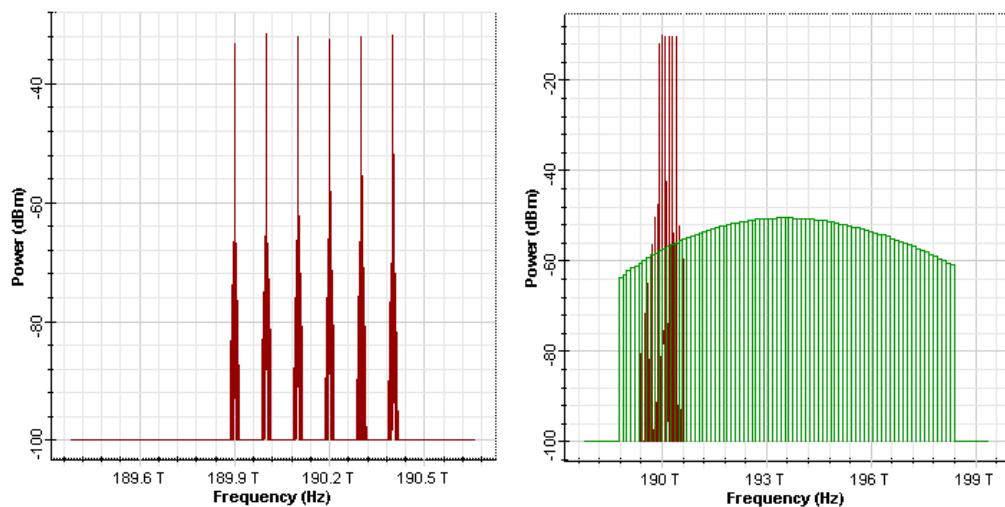
Dosažené hodnoty výkonových úrovní v prvním kanále po aplikování zesilovacího prvku s útlumovým členem jsou zaznamenány v Tab. č. 2.36.

	Downstream		Upstream	
Parametr	Před zesilovačem	Za zesilovačem	Před zesilovačem	Za zesilovačem
P [dBm]	-29,621	-8,131	-32,381	-8,217
OSNR [dB]	70,379	19,737	67,619	16,14
Rozdíl kanálů [dBm]	0,056	0,418	0,0005	0,895

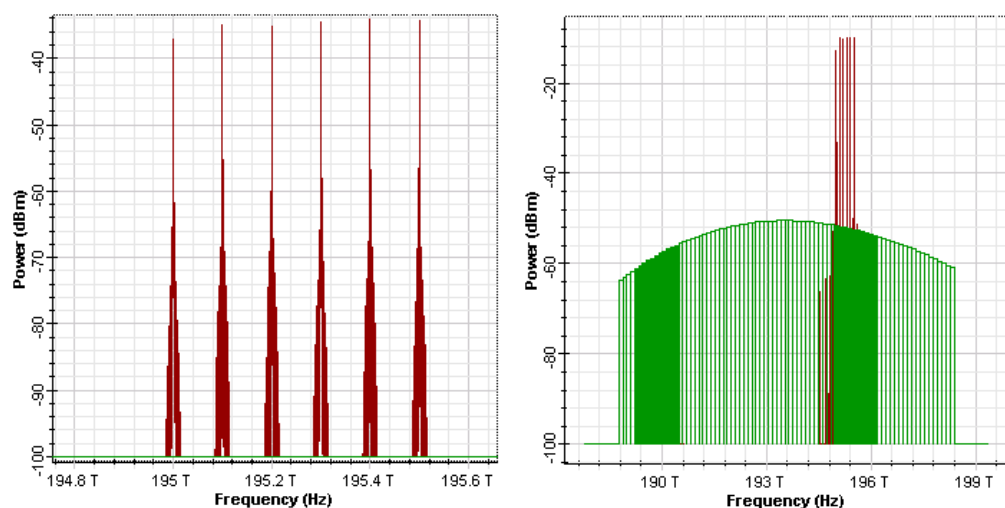
Tab. 2.36: Naměřené hodnoty parametrů pro vložený zesilovací prvek.

Navržený zesilovací prvek dodal optickému signálu v prvním kanálu zisk v downstreamu 21,49 dB a v upstreamu 24,16 dB.

Optické spektrum s přídavným šumem před a za zesilovačem je možné vidět na Obr. č. 2.36; Obr. č. 2.37.



Obr. 2.36: Optické spektrum před a za zesilovačem pro směr downstream.

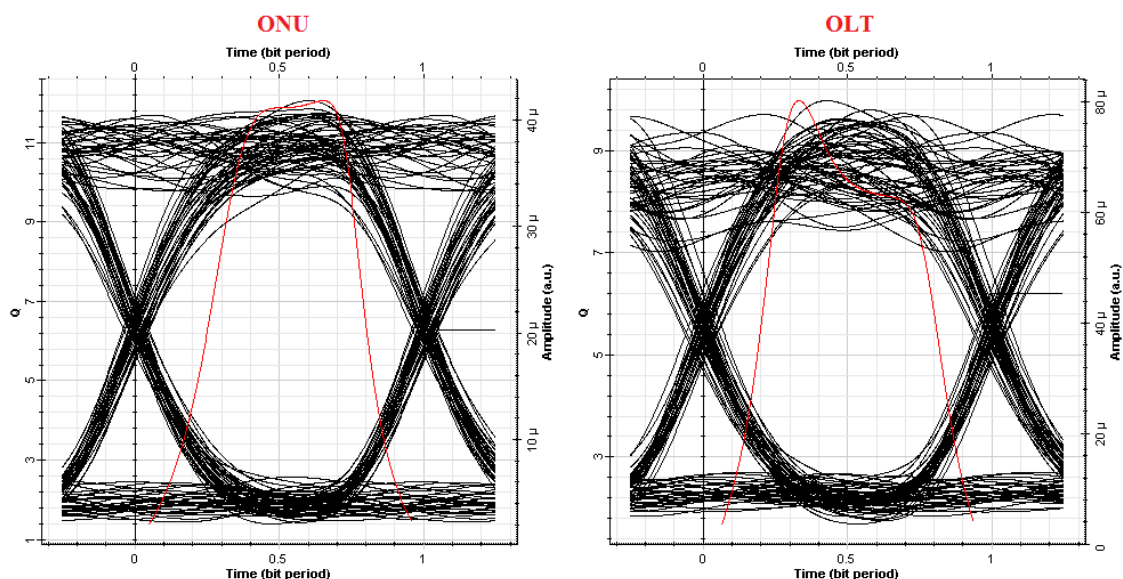


Obr. 2.37: Optické spektrum před a za zesilovačem pro směr upstream.

Kvalitativní parametry Q-faktor a BER, dosáhly po vložení zesilovacího prvku hodnot (viz Tab. č. 2.37) a jim odpovídají diagramy oka vykreslené na Obr. č. 2.38.

Parametr	Downstream	Upstream
Q-faktor [-]	12,051	9,976
BER [-]	$8,88 \cdot 10^{-34}$	$8,96 \cdot 10^{-24}$

Tab. 2.37: Naměřené hodnoty kvalitativních parametrů pro vložený zesilovací prvek.



Obr. 2.38: Diagramy oka na obou koncích přístupové sítě s vloženým zesilovacím prvkem.

Požadovaná bitová chybovost  $BER = 10^{-12}$  v jednom ze směrů byla pro navržený model s aplikovaným zesilovacím prvkem a útlumovým členem dosažena při vzdálenosti optické trasy 22 km. Při takto nastavené vzdálenosti dosáhly kvalitativní parametry hodnot (viz Tab. č. 2.38).

Parametr	Downstream	Upstream
Q-faktor [-]	9,127	6,991
BER [-]	$3,36 \cdot 10^{-20}$	$1,18 \cdot 10^{-12}$

Tab. 2.38: Naměřené hodnoty kvalitativních parametrů pro maximální dosah.

## B.2.2 Druhé umístění zesilovače

### EDFA

Další umístění zesilovacího prvku odpovídá průběžnému zesilovači v obou směrech provozu, kdy zisk jednotlivých EDFA zesilovačů je nastaven na 20 dB.

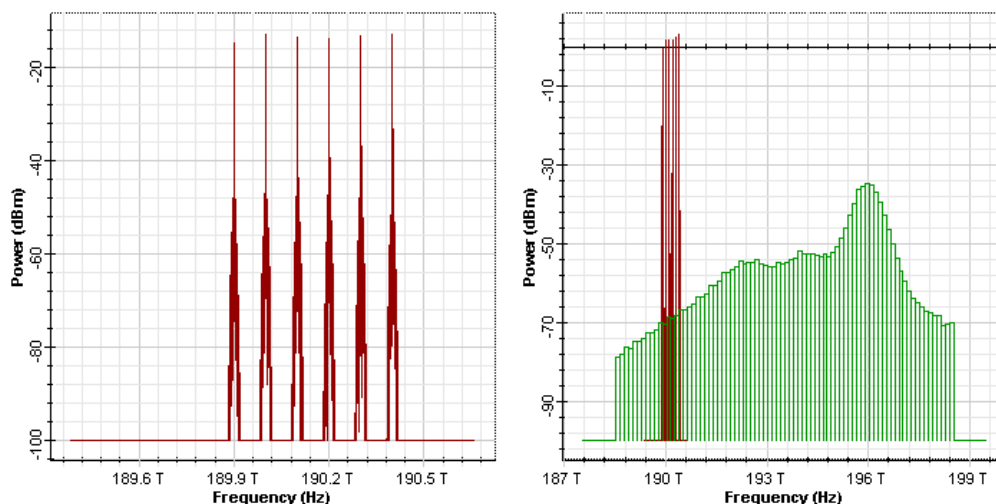
Dosažené výkonové úrovně v prvním kanále po aplikování zesilovacího prvku jsou zaznamenány v Tab. č. 2.39.

	Downstream		Upstream	
Parametr	Před zesilovačem	Za zesilovačem	Před zesilovačem	Za zesilovačem
P [dBm]	-11,001	5,298	-16,001	11,519
OSNR [dB]	88,999	45,617	66,592	33,295
Rozdíl kanálů [dBm]	0,057	2,198	0,0006	7,058

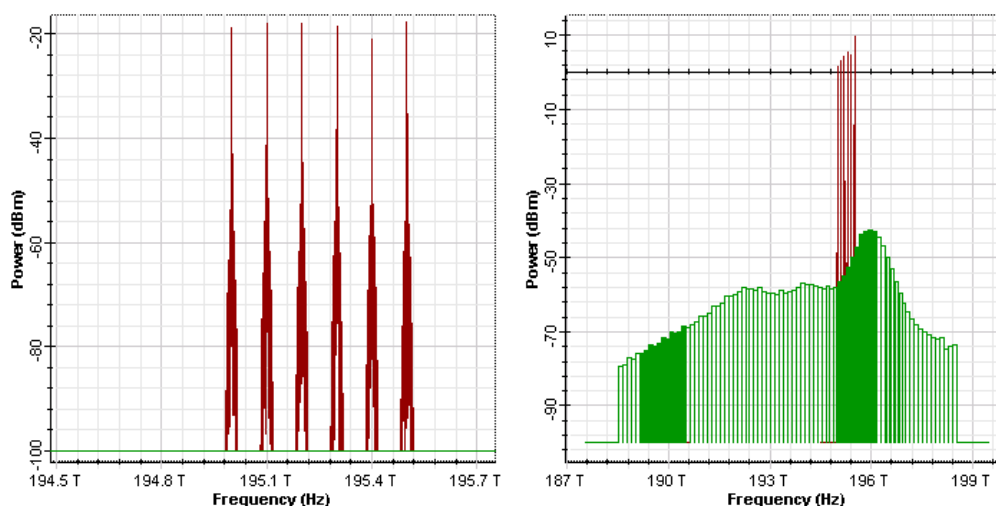
Tab. 2.39: Naměřené hodnoty parametrů pro vložený zesilovací prvek.

Navržený zesilovací prvek dodal optickému signálu v prvním kanálu zisk v downstreamu 5,70 dB a v upstreamu 27,52 dB.

Optické spektrum s přídavným šumem před a za zesilovačem je možné vidět na Obr. č. 2.39; Obr. č. 2.40.



Obr. 2.39: Optické spektrum před a za zesilovačem pro směr downstream.

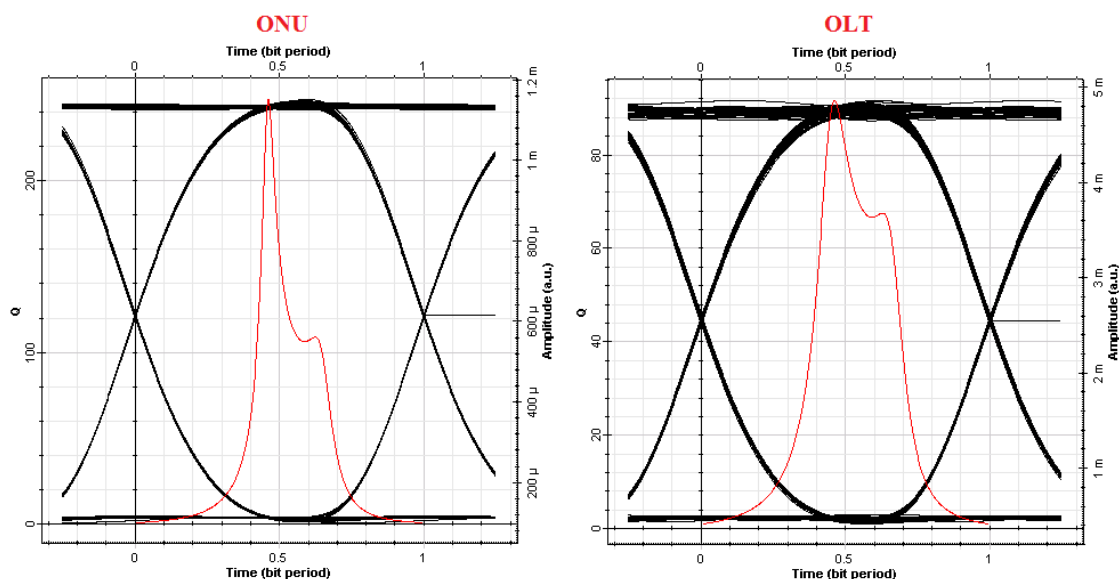


Obr. 2.40: Optické spektrum před a za zesilovačem pro směr upstream.

Kvalitativní parametry Q-faktor a BER, dosáhly po vložení zesilovacího prvku hodnot (viz Tab. č. 2.40) a jim odpovídají diagramy oka vykreslené na Obr. č. 2.41.

Parametr	Downstream	Upstream
Q-faktor [-]	246,985	91,5981
BER [-]	0	0

Tab. 2.40: Naměřené hodnoty kvalitativních parametrů pro vložený zesilovací prvek.



Obr. 2.41: Diagramy oka na obou koncích přístupové sítě s vloženým zesilovacím prvkem.

Požadovaná bitová chybovost  $BER = 10^{-12}$  v jednom ze směrů byla pro navržený model s aplikovaným zesilovacím prvkem dosažena při vzdálenosti optické trasy 95,5 km. Při takto nastavené vzdálenosti dosáhly kvalitativní parametry hodnot (viz Tab. č. 2.41).

Parametr	Downstream	Upstream
Q-faktor [-]	7,021	10,028
BER [-]	$6,93 \cdot 10^{-12}$	$4,99 \cdot 10^{-24}$

Tab. 2.41: Naměřené hodnoty kvalitativních parametrů pro maximální dosah.

### RAMANŮV ZESILOVAČ

V dalším scénáři pro druhé umístění zesilovače se do trasy místo EDFA implementoval Ramanův zesilovač, jehož model je blíže specifikován v podkapitole 6.2.1.

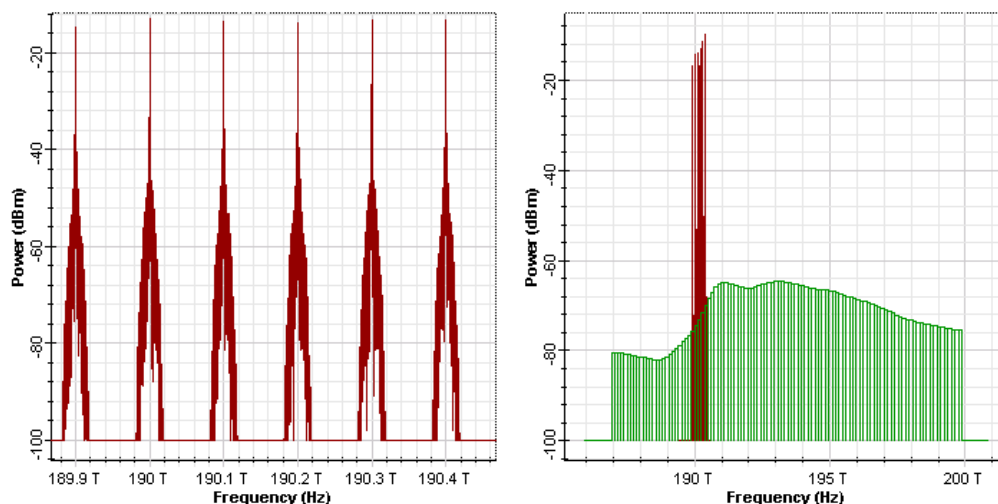
Dosažené hodnoty výkonových úrovní v prvním kanále po aplikování zesilovacího prvku jsou zaznamenány v Tab. č. 2.42.

	Downstream		Upstream	
Parametr	Před zesilovačem	Za zesilovačem	Před zesilovačem	Za zesilovačem
P [dBm]	-11,001	-7,641	-16,001	-9,208
OSNR [dB]	88,999	34,292	83,999	30,363
Rozdíl kanálů [dBm]	0,057	5,451	0,0006	0,949

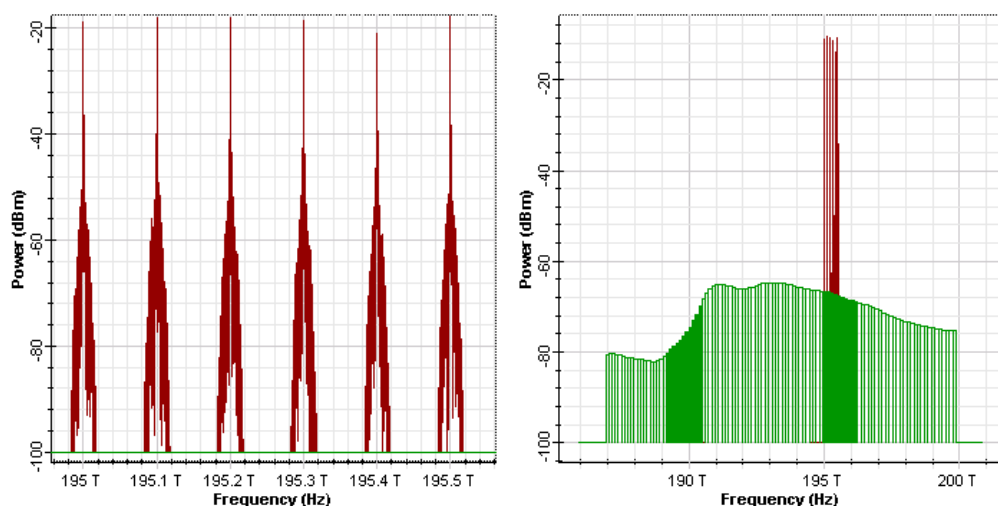
Tab. 2.42: Naměřené hodnoty parametrů pro vložený zesilovací prvek.

Navržený zesilovací prvek dodal optickému signálu v prvním kanálu zisk v downstreamu 3,36 dB a v upstreamu 6,79 dB.

Optické spektrum s přídavným šumem před a za zesilovačem je možné vidět na Obr. č. 2.42; Obr. č. 2.43.



Obr. 2.42: Optické spektrum před a za zesilovačem pro směr downstream.



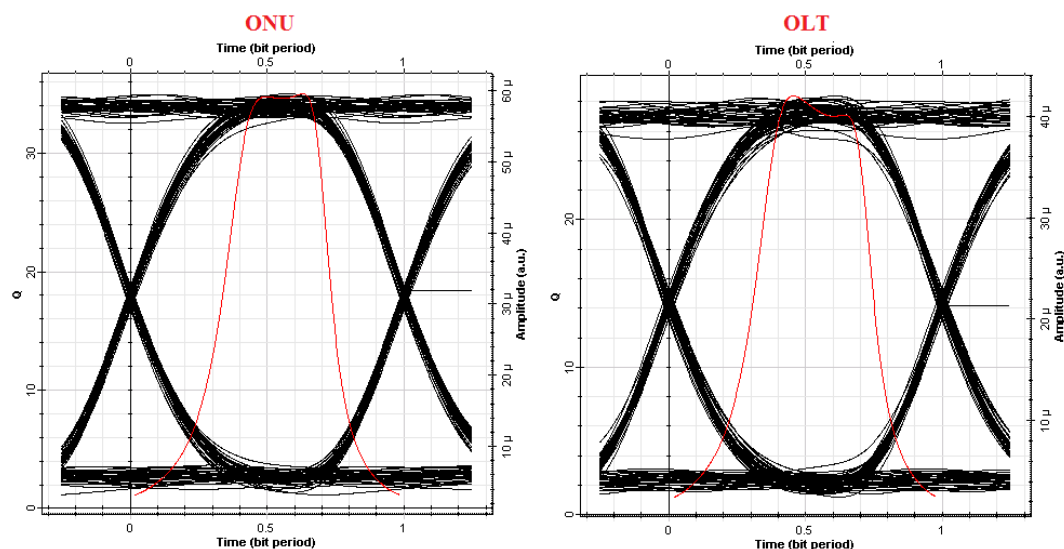
Obr. 2.43: Optické spektrum před a za zesilovačem pro směr upstream.

Kvalitativní parametry Q-faktor a BER, dosáhly po vložení zesilovacího prvku hodnot (viz Tab. č. 2.43) a jim odpovídají diagramy oka vykreslené na Obr. č. 2.44.

Parametr	Downstream	Upstream
Q-faktor [-]	35,027	28,384
BER [-]	$4,33 \cdot 10^{-269}$	$1,57 \cdot 10^{-177}$

Tab. 2.43: Naměřené hodnoty kvalitativních parametrů pro vložený zesilovací prvek.





Obr. 2.44: Diagramy oka na obou koncích přístupové sítě s vloženým zesilovacím prvkem.

Požadovaná bitová chybovost  $BER = 10^{-12}$  v jednom ze směrů byla pro navržený model s aplikovaným zesilovacím prvkem dosažena při vzdálenosti optické trasy 39,5 km. Při takto nastavené vzdálenosti dosáhly kvalitativní parametry hodnot (viz Tab. č. 2.44).

Parametr	Downstream	Upstream
Q-faktor [-]	8,528	6,843
BER [-]	$7,46 \cdot 10^{-18}$	$3,86 \cdot 10^{-12}$

Tab. 2.44: Naměřené hodnoty kvalitativních parametrů pro maximální dosah.

### SOA

V posledním scénáři pro druhé umístění zesilovače se do trasy implementoval SOA zesilovač, jehož model je blíže popsán v podkapitole 6.2.1. Ovšem tento zesilovač optický signál vůbec nezesiloval z důvodu velkých výkonových úrovní na jeho vstupu (neustále pracoval v saturačním režimu). Bylo tedy nutné před něj umístit optický útlumový článek, který signál před vstupem do zesilovače utlumil na požadované hodnoty. V downstreamu měl útlumový člen hodnotu 20 dB v upstreamu pak 15 dB.

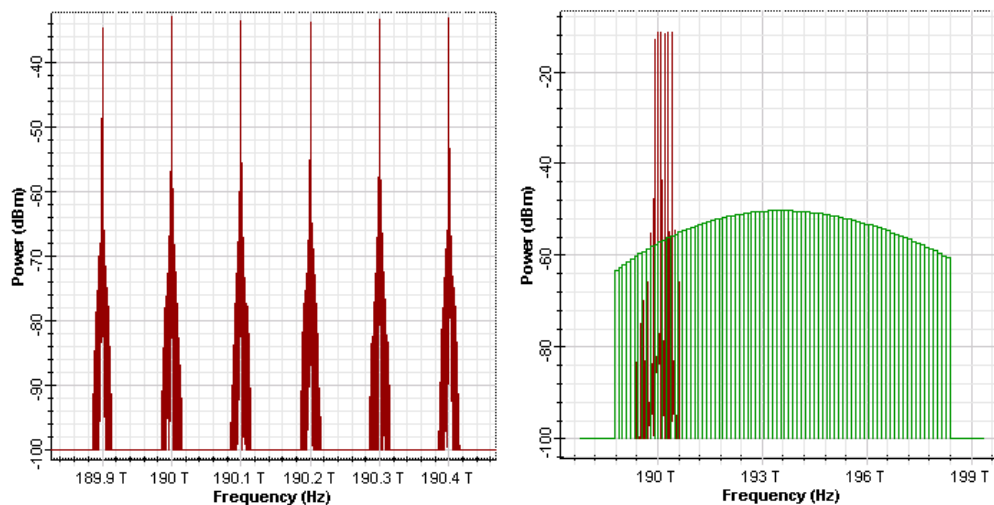
Dosažené hodnoty výkonových úrovní v prvním kanále po aplikování zesilovacího prvku s útlumovým členem jsou zaznamenány v Tab. č. 2.45.

Parametr	Downstream		Upstream	
	Před zesilovačem	Za zesilovačem	Před zesilovačem	Za zesilovačem
P [dBm]	-31,001	-9,39	-31,001	-7,302
OSNR [dB]	68,999	18,325	68,999	17,333
Rozdíl kanálů [dBm]	0,057	0,459	0,0006	1,074

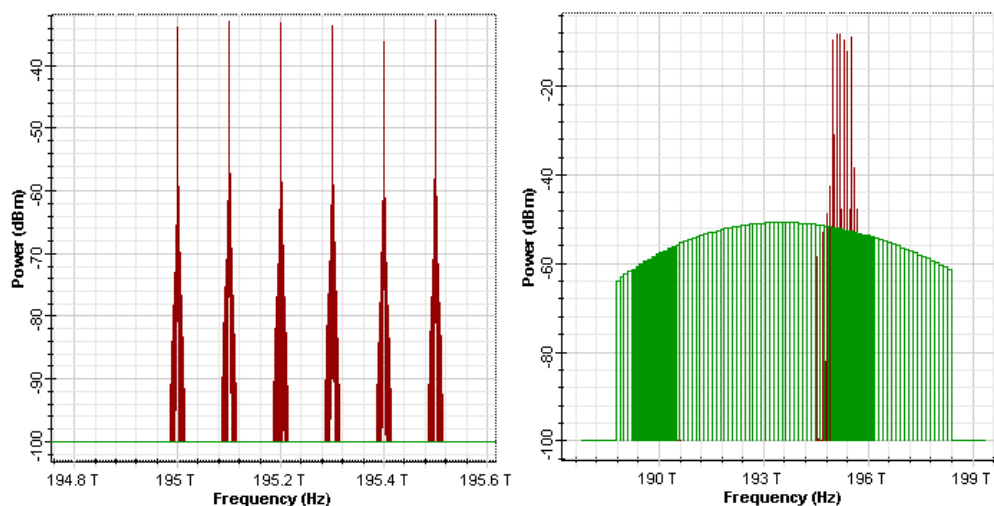
Tab. 2.45 Naměřené hodnoty parametrů pro vložený zesilovací prvek.

Navržený zesilovací prvek dodal optickému signálu v prvním kanálu zisk v downstreamu 21,61 dB a v upstreamu 23,70 dB.

Optické spektrum s přídavným šumem před a za zesilovačem je vidět na Obr. č. 2.45; Obr. č. 2.46.



Obr. 2.45: Optické spektrum před a za zesilovačem pro směr downstream.

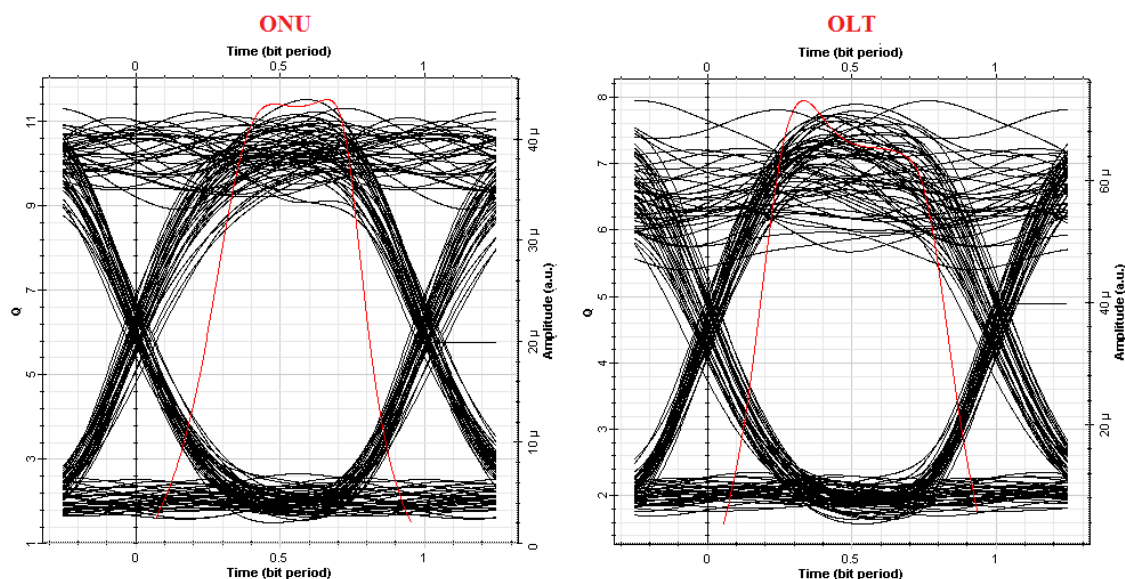


Obr. 2.46: Optické spektrum před a za zesilovačem pro směr upstream.

Kvalitativní parametry Q-faktor a BER, dosáhly po vložení zesilovacího prvku hodnot (viz Tab. č. 2.46) a jim odpovídají diagramy oka vykreslené na Obr. č. 2.47.

Parametr	Downstream	Upstream
Q-faktor [-]	11,504	7,943
BER [-]	$5,84 \cdot 10^{-31}$	$8,54 \cdot 10^{-16}$

Tab. 2.46: Naměřené hodnoty kvalitativních parametrů pro vložený zesilovací prvek.



Obr. 2.47: Diagramy oka na obou koncích přístupové sítě s vloženým zesilovacím prvkem.

Požadovaná bitová chybovost  $BER = 10^{-12}$  v jednom ze směrů byla pro navržený model s aplikovaným zesilovacím prvkem a útlumovým členem dosažena při vzdálenosti optické trasy 31,5 km. Při takto nastavené vzdálenosti dosáhly kvalitativní parametry hodnot (viz Tab. č. 2.47).

Parametr	Downstream	Upstream
Q-faktor [-]	6,825	7,087
BER [-]	$4,34 \cdot 10^{-12}$	$6,13 \cdot 10^{-13}$

Tab. 2.47: Naměřené hodnoty kvalitativních parametrů pro maximální dosah.

### B.2.3 Třetí umístění zesilovače

#### EDFA

Poslední umístění zesilovacího prvku do optické trasy odpovídá předzesilovači ve směru downstream s nastaveným ziskem 20 dB a výkonovému zesilovači ve směru upstream s nastavenou hodnotou zisku 10 dB.

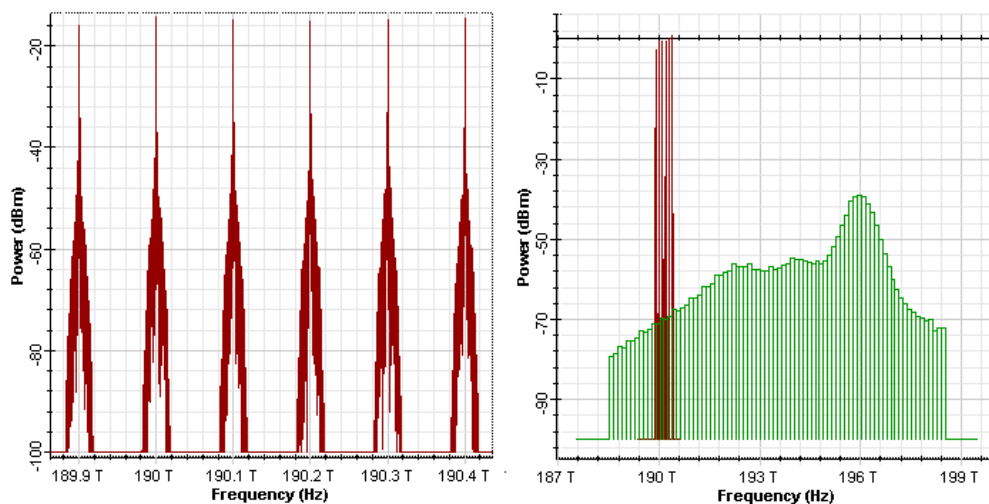
Dosažené výkonové úrovně v prvním kanále po aplikování zesilovacího prvku jsou zaznamenány v Tab. č. 2.48.

	Downstream		Upstream	
Parametr	Před zesilovačem	Za zesilovačem	Před zesilovačem	Za zesilovačem
P [dBm]	-12,381	0,99	-14,621	4,426
OSNR [dB]	87,619	43,838	68,986	35,706
Rozdíl kanálů [dBm]	0,057	2,016	0,0006	6,715

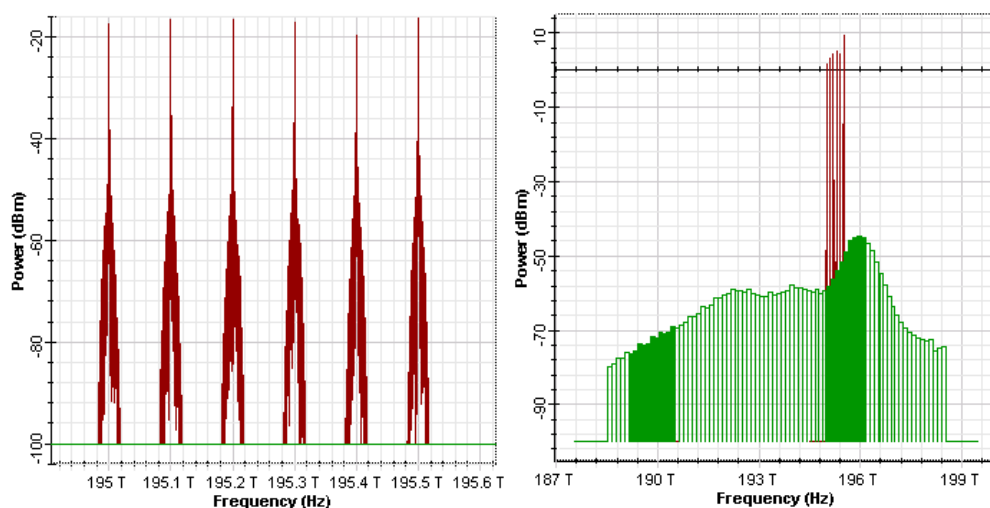
Tab. 2.48: Naměřené hodnoty parametrů pro vložený zesilovací prvek.

Navržený zesilovací prvek dodal optickému signálu v prvním kanálu zisk v downstreamu 13,23 dB a v upstreamu 19,05 dB.

Optické spektrum s přídavným šumem před a za zesilovačem je vidět na Obr. č. 2.48; Obr. č. 2.49.



Obr. 2.48: Optické spektrum před a za zesilovačem pro směr downstream.

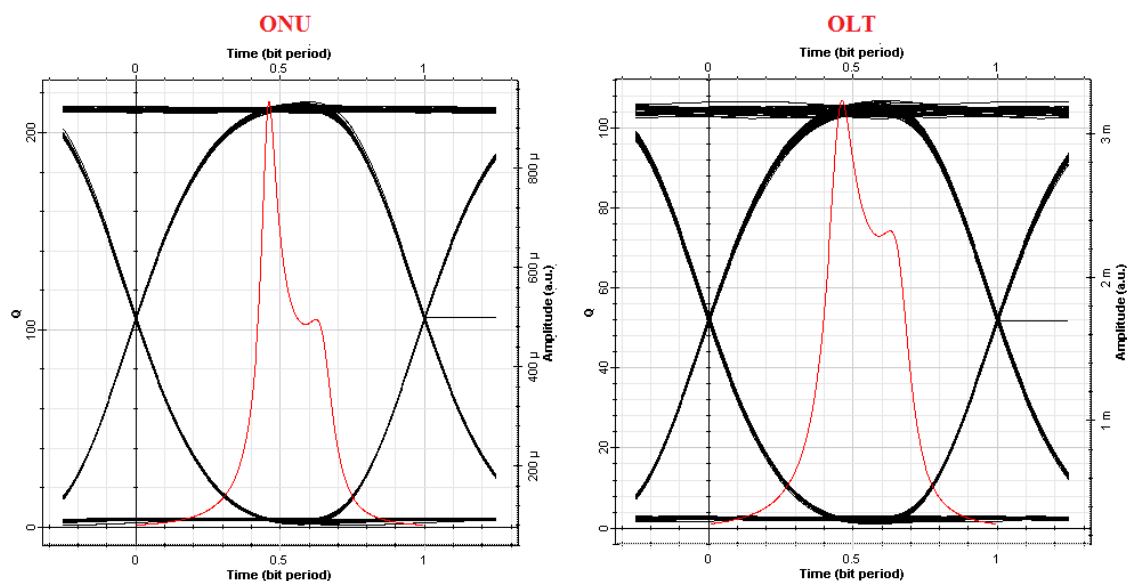


Obr. 2.49: Optické spektrum před a za zesilovačem pro směr upstream.

Kvalitativní parametry Q-faktor a BER, dosáhly po vložení zesilovacího prvku hodnot (viz Tab. č. 2.49) a jim odpovídají diagramy oka vykreslené na Obr. č. 2.50.

Parametr	Downstream	Upstream
Q-faktor [-]	215,546	106,798
BER [-]	0	0

Tab. 2.49: Naměřené hodnoty kvalitativních parametrů pro vložený zesilovací prvek.



Obr. 2.50: Diagramy oka na obou koncích přístupové sítě s vloženým zesilovacím prvkem.

Požadovaná bitová chybovost  $BER = 10^{-12}$  v jednom ze směrů byla pro navržený model s aplikovaným zesilovacím prvkem dosažena při vzdálenosti optické trasy 88 km. Při takto nastavené vzdálenosti dosáhly kvalitativní parametry hodnot (viz Tab. č. 2.50).

Parametr	Downstream	Upstream
Q-faktor [-]	6,912	31,87
BER [-]	$2,37 \cdot 10^{-12}$	$3,46 \cdot 10^{-223}$

Tab. 2.50: Naměřené hodnoty kvalitativních parametrů pro maximální dosah.

### RAMANŮV ZESILOVAČ

V dalším scénáři pro třetí umístění zesilovače se do trasy místo EDFA implementoval Ramanův zesilovač, jenž je popsán v podkapitole 6.2.1.

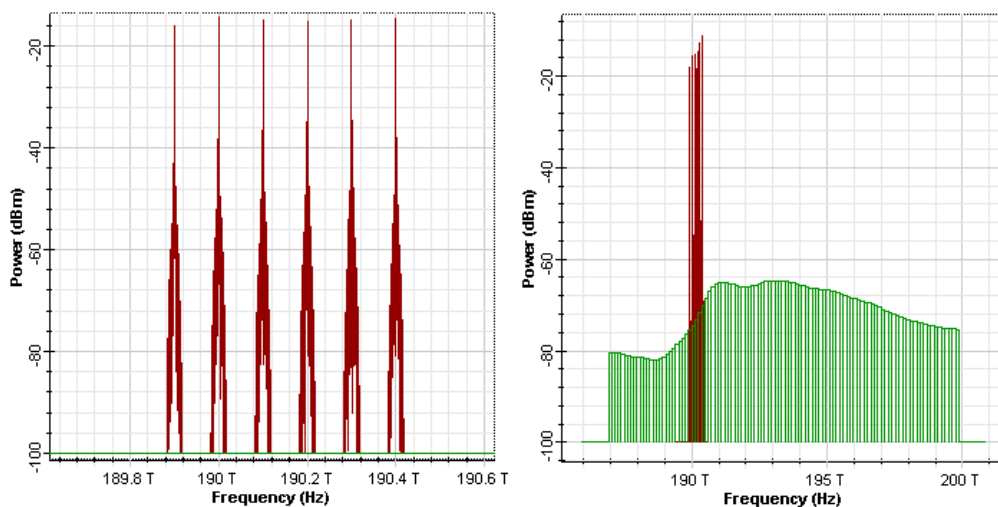
Dosažené hodnoty výkonových úrovní v prvním kanále po aplikování zesilovacího prvku jsou zaznamenány v Tab. č. 2.51.

	Downstream		Upstream	
Parametr	Před zesilovačem	Za zesilovačem	Před zesilovačem	Za zesilovačem
P [dBm]	-12,381	-9,014	-14,621	-7,845
OSNR [dB]	87,619	32,915	85,379	31,741
Rozdíl kanálů [dBm]	0,057	5,456	0,0006	0,948

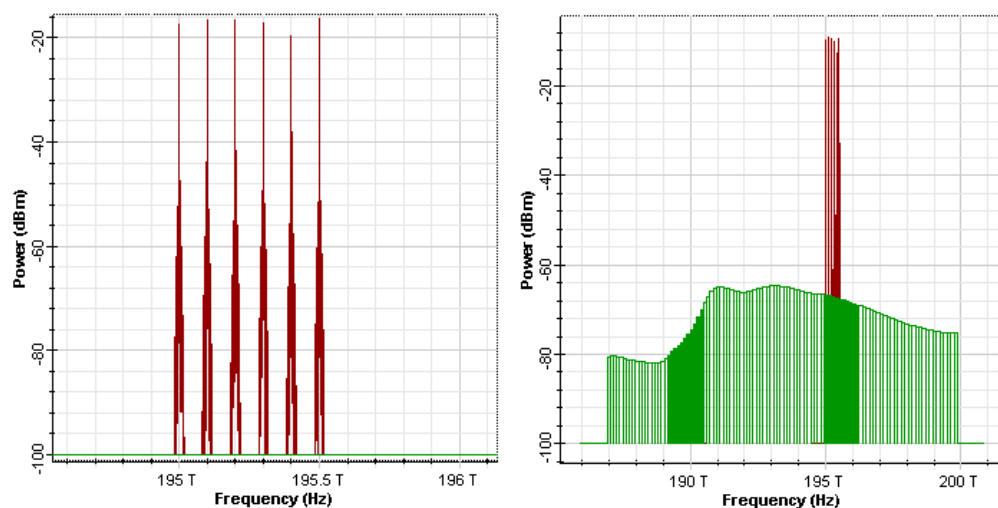
Tab. 2.51: Naměřené hodnoty parametrů pro vložený zesilovací prvek.

Navržený zesilovací prvek dodal optickému signálu zisk v downstreamu 3,37 dB a v upstreamu 6,78 dB.

Optické spektrum s přídavným šumem před a za zesilovačem je vidět na Obr. č. 2.51; Obr. č. 2.52.



Obr. 2.51: Optické spektrum před a za zesilovačem pro směr downstream.

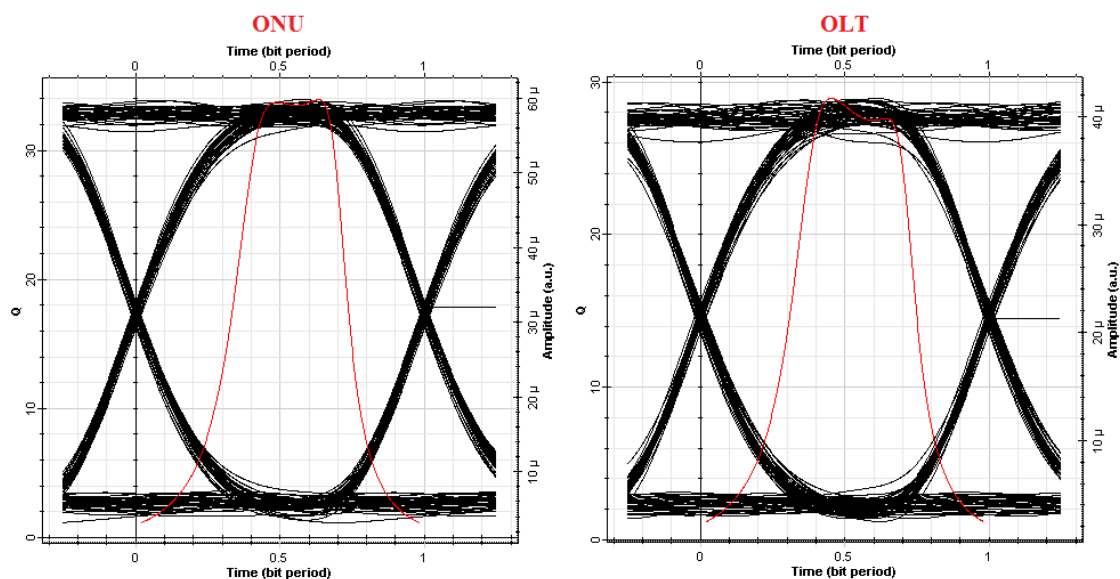


Obr. 2.52: Optické spektrum před a za zesilovačem pro směr upstream.

Kvalitativní parametry Q-faktor a BER, dosáhly po vložení zesilovacího prvku hodnot (viz Tab. č. 2.52) a jim odpovídají diagramy oka vykreslené na Obr. č. 2.53.

Parametr	Downstream	Upstream
Q-faktor [-]	33,93	28,925
BER [-]	$1,22 \cdot 10^{-252}$	$2,78 \cdot 10^{-184}$

Tab. 2.52: Naměřené hodnoty kvalitativních parametrů pro vložený zesilovací prvek.



Obr. 2.53: Diagramy oka na obou koncích přístupové sítě s vloženým zesilovacím prvkem.

Požadovaná bitová chybovost  $BER = 10^{-12}$  v jednom ze směrů byla pro navržený model s aplikovaným zesilovacím prvkem dosažena při vzdálenosti optické trasy 38,5 km. Při takto nastavené vzdálenosti dosáhly kvalitativní parametry hodnot (viz Tab. č. 2.53).

Parametr	Downstream	Upstream
Q-faktor [-]	9,196	6,854
BER [-]	$1,86 \cdot 10^{-20}$	$3,59 \cdot 10^{-12}$

Tab. 2.53: Naměřené hodnoty kvalitativních parametrů pro maximální dosah.

### SOA

V posledním scénáři pro třetí umístění zesilovače se do trasy implementoval SOA zesilovač, jenž je popsán v podkapitole 6.2.1. Ovšem tento zesilovač optický signál vůbec nezsiloval z důvodu velkých výkonových úrovní na jeho vstupu (neustále pracoval v saturačním režimu). Bylo tedy nutné před něj umístit optický útlumový článek, který signál před vstupem do zesilovače utlumil. V downstreamu měl útlumový člen hodnotu 15 dB v upstreamu pak 15 dB.

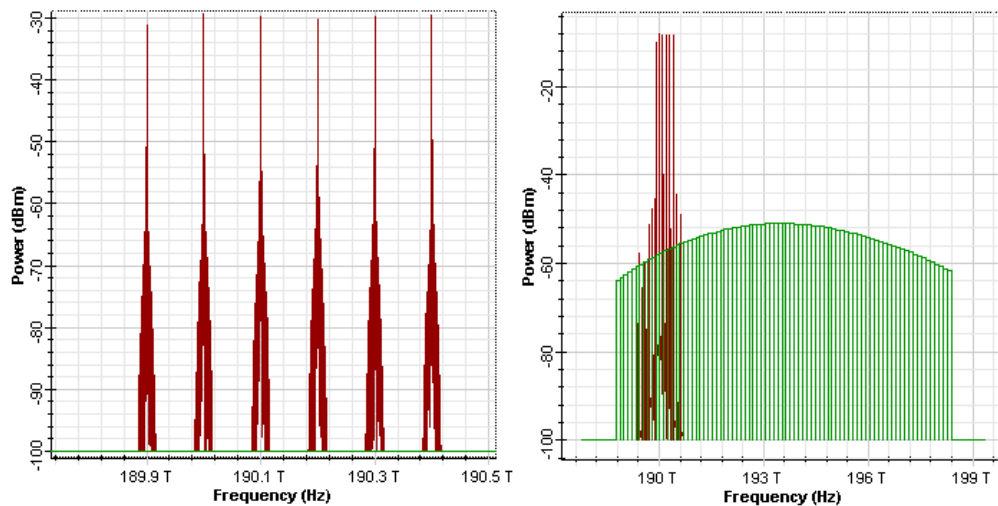
Dosažené hodnoty výkonových úrovní v prvním kanále po aplikování zesilovacího prvku s útlumovým členem jsou zaznamenány v Tab. č. 2.54.

	Downstream		Upstream	
Parametr	Před zesilovačem	Za zesilovačem	Před zesilovačem	Za zesilovačem
P [dBm]	-27,381	-6,252	-29,621	-6,542
OSNR [dB]	72,619	21,996	70,379	18,399
Rozdíl kanálů [dBm]	0,057	0,509	0,0006	1,33

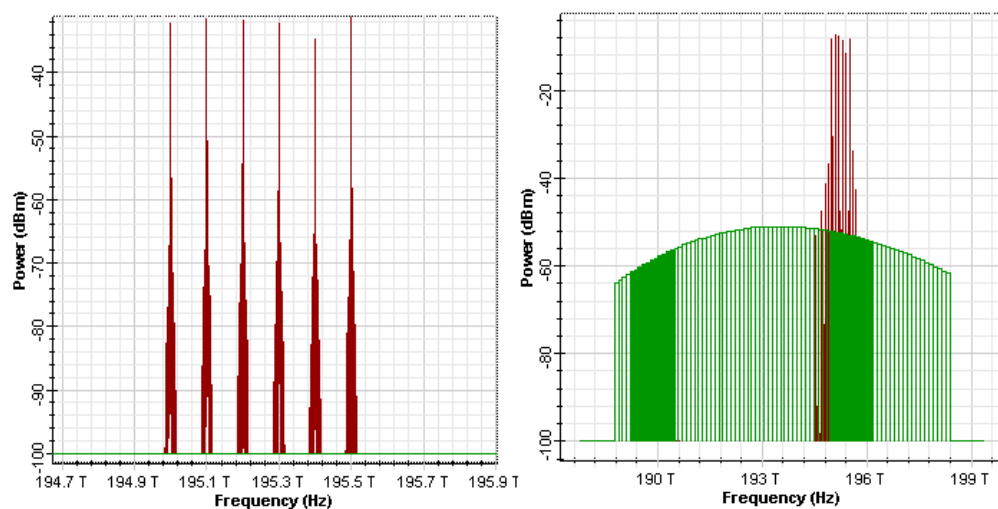
Tab. 2.54: Naměřené hodnoty parametrů pro vložený zesilovací prvek.

Navržený zesilovací prvek dodal optickému signálu zisk v downstreamu 21,13 dB a v upstreamu 23,08 dB.

Optické spektrum s přídavným šumem před a za zesilovačem je vidět na Obr. č. 2.54; Obr. č. 2.55.



Obr. 2.54: Optické spektrum před a za zesilovačem pro směr downstream.



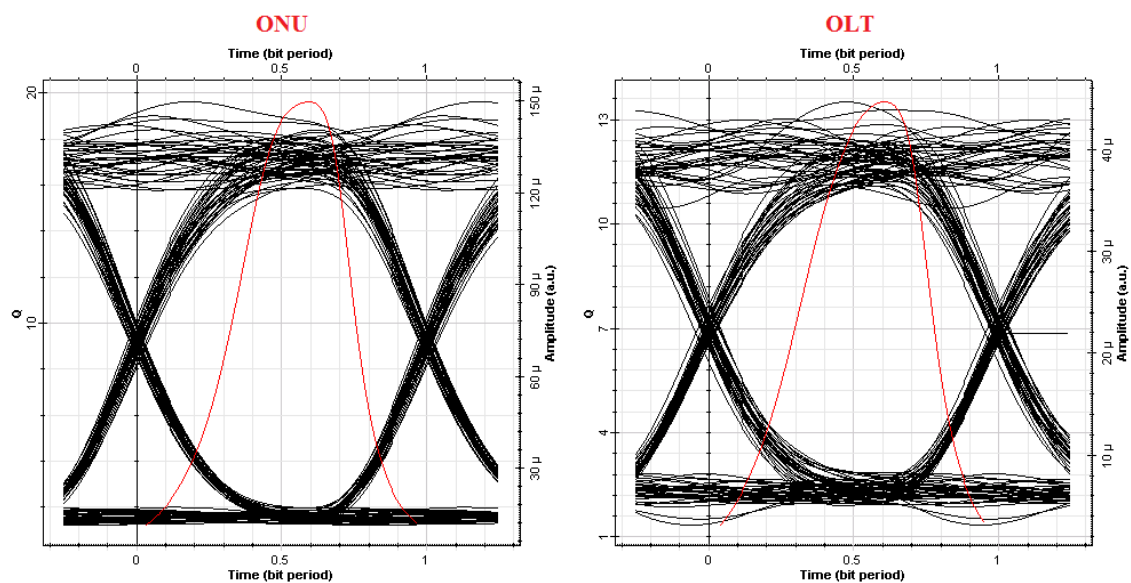
Obr. 2.55: Optické spektrum před a za zesilovačem pro směr upstream.

Kvalitativní parametry Q-faktor a BER, dosáhly po vložení zesilovacího prvku hodnot (viz Tab. č. 2.55) a jim odpovídají diagramy oka vykreslené na Obr. č. 2.56.

Parametr	Downstream	Upstream
Q-faktor [-]	11,631	7,835
BER [-]	$1,20 \cdot 10^{-31}$	$1,99 \cdot 10^{-15}$

Tab. 2.55: Naměřené hodnoty kvalitativních parametrů pro vložený zesilovací prvek.





Obr. 2.56: Diagramy oka na obou koncích přístupové sítě s vloženým zesilovacím prvkem.

Požadovaná bitová chybovost  $BER = 10^{-12}$  v jednom ze směrů byla pro navrhnutý model s aplikovaným zesilovacím prvkem a útlumovým členem dosažena při vzdálenosti optické trasy 22 km. Při takto nastavené vzdálenosti dosáhly kvalitativní parametry hodnot (viz Tab. č. 2.56).

Parametr	Downstream	Upstream
Q-faktor [-]	12,902	7,032
BER [-]	$1,86 \cdot 10^{-38}$	$2,22 \cdot 10^{-12}$

Tab. 2.56: Naměřené hodnoty kvalitativních parametrů pro maximální dosah.